



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

POROVNÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA

ECONOMIC COMPARISON OF LIGHT SOURCES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Růžička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Štěpánek

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Student: Josef Růžička

Ústav elektroenergetiky

ID: 203332

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Porovnání světelných zdrojů z ekonomického hlediska

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracování literární rešerše týkající se světelných zdrojů a jejich základních parametrů
2. Měření světelně-elektrických veličin vybraných světelných zdrojů, které představují v současné době nejpoužívanější zdroje ve světelné technice
3. Vypočtení ekonomických ukazatelů pro měřené světelné zdroje
4. Porovnání vypočtených ukazatelů pro použité světelné zdroje

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3. 2. 2020

Termín odevzdání: 10. 6. 2020

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Štěpánek

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního
programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce

RŮŽIČKA, Josef. *Porovnání světelných zdrojů z ekonomického hlediska*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127272>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslav Štěpánek.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma porovnání světelných zdrojů z ekonomického hlediska jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 10. 6. 2020

.....

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá ekonomickým porovnáním světelných zdrojů. Na trhu v současné době neexistuje veličina, pomocí které by se světelné zdroje daly z ekonomického hlediska mezi sebou dlouhodobě porovnat. Hlavním cílem práce je tedy pomocí výpočtů ze zadaných (nebo přímo změřených) parametrů světelného zdroje stanovit jednotné celkové náklady na svícení, díky kterým pak bude možné seřadit zdroje podle cenové výhodnosti.

Vyhodnocování probíhá na základě měření 28 světelných zdrojů z různých skupin: klasické žárovky, halogenové žárovky, kompaktní zářivky, kompaktní LED retrofity a stmívatelné LED retrofity s přepínatelnými barevnými režimy. Jedná se o světelné zdroje určené pro osvětlování interiérů domácností, kanceláří, chodeb, atd.

V závěrečné části práce se vyjasňuje, jaké světelné zdroje a z jakých důvodů jsou nejvýhodnější a mají největší potenciál do budoucna. Dochází také k porovnání teoretických parametrů udaných výrobcem a parametrů přímo změřených v laboratoři a zhodnocení odchylek mezi nimi.

Využití práce spočívá v tom, že spotřebiteli poskytuje výpočetní strukturu, která mu pomůže zorientovat se v nákladech při nákupu světelného zdroje. Dalším přínosem je přehledný popis a poznatky o světelných zdrojích v teoretické části práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: světelný zdroj; náklady na svícení; měrný výkon; ekonomické porovnání; LED retrofit

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the economic comparison of light sources. On the market there is currently no physical quantity that would enable the light sources to be compared from an economic point of view in long-term perspective. The main objective of the work is, therefore, by calculations of the specified (or directly measured) parameters of the light source to provide a uniform total cost of lighting, thanks to which it will then be possible to sort the sources according to the price benefit.

Evaluation is based on measurements of 28 light sources from different groups: the classical bulbs, halogen bulbs, compact fluorescent bulbs, compact LED retrofits and dimmable LED retrofits with color-changeable modes. These light sources are meant to be used for indoor home lighting, offices, halls, etc.

The final part of the paper clarifies what kind of light sources and for what reasons they are the most profitable and have the greatest potential for the future. There's also a comparison of theoretical parameters provided by the manufacturer, and parameters directly measured in the laboratory and the evaluation of the deviations between them.

The use of this thesis comes from provision of the calculation structure to a user who will better understand the topic of costs while purchasing the light source. Well arranged description and information about the light sources in theoretical part of the thesis is another utility to be mentioned.

KEY WORDS: light source; lighting cost; luminous efficacy; economic comparison; LED retrofit

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD	12
1 ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY	13
1.1 ELEKTRICKÝ PŘÍKON	13
1.2 SVĚTELNÝ TOK.....	14
1.3 MĚRNÝ VÝKON.....	14
1.4 INDEX PODÁNÍ BAREV	16
1.5 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI.....	18
1.6 STŘEDNÍ DOBA ŽIVOTA	18
1.7 ENERGETICKÁ TŘÍDA	19
POSTUP VÝPOČTU ENERGETICKÉ TŘÍDY PRO SVĚTELNÉ ZDROJE.....	19
2 SVĚTELNÉ ZDROJE	22
2.1 TEPLOTNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE	22
2.1.1 KLASICKÁ ŽÁROVKA	22
2.1.2 HALOGENOVÁ ŽÁROVKA	24
2.2 VÝBOJOVÉ SVĚTELNÉ ZDROJE.....	25
2.2.1 LINEÁRNÍ ZÁŘIVKA.....	26
2.2.2 KOMPAKTNÍ ZÁŘIVKA	26
2.3 ELEKTROLUMINISCENČNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE.....	27
2.3.1 KOMPAKTNÍ LED RETROFIT	28
2.3.2 LINEÁRNÍ LED RETROFIT	29
3 EKONOMICKÁ ČÁST	30
3.1 UNIVERZÁLNÍ METODA	30
3.2 METODA PO KROCÍCH	33
4 PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
4.1 MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	36
4.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	45
4.2.1 UNIVERZÁLNÍ METODA.....	45
4.2.2 METODA PO KROCÍCH.....	51
ZÁVĚR.....	58
POUŽITÁ LITERATURA	60
PŘÍLOHA A – SPEKTRÁLNÍ PRŮBĚHY ZMĚŘENÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ.....	66
PŘÍLOHA B – FOTOGRAFIE MĚŘENÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	74

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<i>Obr. 1-1 Balení LED retrofitu s parametry [1].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 1-2 Spektrální citlivost lidského oka – křivka $V(\lambda)$ [8]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1-3 Porovnání různých indexů podání barev [9].....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1-4 Spektrální průběhy světelných zdrojů [10].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1-5 Škála teplot chromatičnosti [14]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 1-6 Současné energetické třídy [17]</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 2-1 Struktura klasické žárovky [21].....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2-2 Halogenová autožárovka [24].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-3 Halogenová žárovka s přídavnou baňkou [25]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-4 Halogenový cyklus [26].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-5 Konstrukce lineární zářivky [28].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-6 Spirálová kompaktní zářivka [29]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2-7 Kompaktní LED retrofit [33].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2-8 Lineární LED retrofit [34]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-1 Schéma uspořádání kulového integrátoru [6].....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 4-2 Spektrální průběhy měřených LED retrofitů OSRAM 8,5 W.....</i>	<i>44</i>
 <i>Graf 1 Spektrální průběhy klasických žárovek.....</i>	 <i>66</i>
<i>Graf 2 Spektrální průběhy halogenových žárovek</i>	<i>67</i>
<i>Graf 3 Spektrální průběhy kompaktních zářivek OSRAM Dulux 12 W.....</i>	<i>67</i>
<i>Graf 4 Spektrální průběhy kompaktních zářivek OSRAM Dulux 15 W.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 5 Spektrální průběhy kompaktních zářivek OSRAM Dulux 23 W.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 6 Spektrální průběh LED retrofitu Flair 6 W</i>	<i>69</i>
<i>Graf 7 Spektrální průběhy LED retrofitů EMOS 8 W</i>	<i>69</i>
<i>Graf 8 Spektrální průběhy LED retrofitů OSRAM 8,5 W.....</i>	<i>70</i>
<i>Graf 9 Spektrální průběhy LED retrofitů CENTURY 10 W</i>	<i>70</i>
<i>Graf 10 Spektrální průběhy LED retrofitů Megaman 11 W.....</i>	<i>71</i>
<i>Graf 11 Spektrální průběh LED retrofitu Livarnolux 19 W.....</i>	<i>71</i>
<i>Graf 12 Spektrální průběhy 3 režimové LED Vitae</i>	<i>72</i>
<i>Graf 13 Spektrální průběhy LED retrofitu EMOS SMD2835</i>	<i>72</i>
<i>Graf 14 Spektrální průběhy LED retrofitu TRÁDFRI při maximálním světelném toku.....</i>	<i>73</i>
 <i>Foto 1 Měřené světelné zdroje</i>	 <i>74</i>

SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Obvyklé řady příkonů pro běžné domácnosti [2] [3] [4]	13
Tab. 1-2 Obvyklá škála světelných toků zdrojů pro běžné domácnosti [2] [3] [4] [7]	14
Tab. 1-3 Měrné výkony jednotlivých skupin světelných zdrojů [2] [3] [5] [6] [7]	15
Tab. 1-4 Indexy podání barev jednotlivých skupin světelných zdrojů [2] [3] [5] [6] [7]	16
Tab. 1-5 Střední doby života jednotlivých skupin zdrojů	18
Tab. 1-6 Výkon upravený o ztráty ovladačů světelného zdroje [19]	20
Tab. 1-7 Energetická třída v závislosti na EEI [19]	20
Tab. 1-8 Činitele F_{TM} dle typu světelného zdroje [20]	21
Tab. 1-9 Energetická třída světelných zdrojů v závislosti na η_{TM} [20]	21
Tab. 2-1 Parametry klasických žárovek [6]	23
Tab. 2-2 Parametry halogenových žárovek [5] [6]	25
Tab. 2-3 Parametry lineárních zářivek [6]	26
Tab. 2-4 Parametry kompaktních zářivek [2] [3] [6]	27
Tab. 2-5 Parametry kompaktních a lineárních LED retrofitů [2] [6] [30] [31]	28
Tab. 3-1 Příklady nákladů na produkci světelného množství jednotlivých zdrojů [36] [37] [38] [39] [40] [41]	32
Tab. 3-2 Konkrétní náklady na světelné zdroje	32
Tab. 3-3 Srovnávané světelné zdroje [36] [37] [38] [39] [40] [41]	33
Tab. 3-4 Referenční hodnoty	33
Tab. 3-5 Srovnávané veličiny světelných zdrojů	35
Tab. 4-1 Parametry LED retrofitů udané výrobcem [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53]	36
Tab. 4-2 Parametry světelných zdrojů udané výrobcem [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60]	37
Tab. 4-3 Parametry LED retrofitů s různými režimy provozu udané výrobcem [61] [62] [63]	38
Tab. 4-4 Ustálené změřené a vypočtené hodnoty zdrojů	40
Tab. 4-5 Ustálené změřené a vypočtené hodnoty LED retrofitů	41
Tab. 4-6 Ustálené změřené a vypočtené hodnoty LED retrofitů s různými režimy provozu	42
Tab. 4-7 Rozdíly v parametrech světelných zdrojů	43
Tab. 4-8 Porovnání parametrů sady LED retrofitů OSRAM	43
Tab. 4-9 Ekonomické ukazatele pro teoretické parametry světelných zdrojů	46
Tab. 4-10 Ekonomické ukazatele pro změřené parametry světelných zdrojů	48
Tab. 4-11 Ekonomické ukazatele pro změřené parametry LED retrofitů s různými režimy provozu	49

<i>Tab. 4-12 Nejvýraznější rozdíly v nákladech při uvažování parametrů od výrobce a parametrů změřených.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 4-13 Podrobnější ekonomické ukazatele pro parametry světelných zdrojů udané výrobcem</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 4-14 Podrobnější ekonomické ukazatele pro parametry LED retrofitů udané výrobcem</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 4-15 Podrobnější ekonomické ukazatele pro parametry LED s různými režimy provozu udané výrobcem.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 4-16 Podrobnější ekonomické ukazatele pro změřené parametry světelných zdrojů</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 4-17 Podrobnější ekonomické ukazatele pro změřené parametry LED retrofitů</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 4-18 Podrobnější ekonomické ukazatele pro změřené parametry LED s různými režimy provozu</i>	<i>56</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
A	Průměrná cena elektřiny za 1 kWh	Kč.(kWh) ⁻¹
EEI	Index energetické účinnosti	-
F_{TM}	Činitel pro výpočet energetické třídy světelného zdroje	-
k_{kor}	Korekční činitel	-
k_1	Koeficient zohledňující podání barev	-
k_2	Koeficient zohledňující přepínatelné barevné režimy	-
k_3	Koeficient zohledňující regulovatelný světelný tok	-
m_ϕ	Celkově světelné množství zdroje	Mlm.h
M_z	Měrný výkon	lm.W ⁻¹
N	Celkové vynaložené náklady za svícení	Kč
N_{cel}	Celkové náklady za světelný zdroj	Kč
N_{el}	Modifikovaná cena za provoz světelného zdroje	Kč
$N_{nákup}$	Modifikované pořizovací náklady světelných zdrojů	Kč
$N_{poř}$	Modifikovaná pořizovací cena světelného zdroje	Kč
N_{provoz}	Modifikované náklady na provoz světelných zdrojů	Kč
N_{xel}	Cena za provoz světelného zdroje za dobu života	Kč
$N_{xnákup}$	Pořizovací náklady světelných zdrojů	Kč
$N_{xpoř}$	Pořizovací cena světelného zdroje	Kč
$N_{xprovoz}$	Náklady na provoz světelných zdrojů	Kč
N_ϕ	Náklady na produkci jednotkového světelného množství	Kč.(Mlm.h) ⁻¹
P	Výkon (příkon)	W
P_c	Celkový příkon sady	W
P_{cor}	Výkon upravený o případné ztráty ovladačů	W
P_{on}	Deklarovaný elektrický příkon v zapnutém stavu	W
P_{rated}	Jmenovitý výkon světelného zdroje	W
P_{ref}	Referenční výkon	W
R_a	Index podání barev	-
R_{at}	Teoretický index podání barev	-
R_f	Color fidelity index	-
t_R	Referenční doba svícení	h
t_z	Střední doba života	h

T_c	Teplota chromatičnosti	K
T_{cp}	Náhradní teplota chromatičnosti	K
n	Počet sad potřebný k pokrytí doby svícení t_R	-
δM_z	Relativní odchylka měrných výkonů	%
δN	Relativní odchylka celkových vynaložených nákladů	%
ΔP	Elektrické ztráty zdroje v předřadných obvodech	W
η_{TM}	Celkový síťový měrný výkon	lm.W ⁻¹
λ	Vlnová délka	nm
Σ	Počet kusů v sadě na referenční tok Φ_R	-
Σ_c	Celkový počet kusů	-
Φ	Světelný tok	lm
$\Phi_e(\lambda)$	Spektrální zářivý tok	W.nm ⁻¹
$\Phi_{KIprázdný}$	Světelný tok korekčního zdroje v prázdném KI	lm
$\Phi_{KIse svítidlem}$	Světelný tok korekčního zdroje v KI se svítidlem	lm
Φ_R	Referenční světelný tok	lm
Φ_{use}	Užitečný světelný tok zdroje	lm

Zkratka	Význam
C1, C2	Clonky
D	Průměr integrátoru
EU	Evropská unie
F	Spektroradiometr
K	Korekční zdroj
LED	Světelná dioda
UV	Ultrafialové záření
KI	Kulový integrátor
Z	Měřený světelný zdroj

ÚVOD

V dnešní době se na trhu vyskytuje mnoho druhů světelných zdrojů, ve kterých se začíná pro běžného laika být obtížné orientovat. Vzhledem k podstatným rozdílům mezi cenami jednotlivých zdrojů je důležité vědět, jestli se uživateli investice do těchto zdrojů v konečném důsledku vyplatí. Parametry dostupných světelných zdrojů mezi sebou není snadné z komplexního a dlouhodobého hlediska porovnat. Jediné dostupné porovnání spočívá v tom, že výrobci uvádí k danému zdroji informaci o ekvivalentním elektrickém příkonu klasické žárovky, která zajistí totožný světelný tok jako daný zdroj.

Hlavním cílem této práce je vytvořit přehledný ekonomický srovnávací systém pro světelné zdroje běžně používané v domácnostech, tedy pro klasické a halogenové žárovky, lineární a kompaktní zářivky a LED světelné zdroje. Pomocí něj pak bude jednoznačné, jaký světelný zdroj bude pro uživatele nejlevnější a nejvhodnější.

Teoretická část práce se zabývá principy a popisem jednotlivých typů světelných zdrojů a vysvětluje základní světelně-technické veličiny, jež jsou s jejich popisem spjaté. Dále jsou zde rozebrány postupy k výpočtům ekonomických ukazatelů, které jsou pak součástí celkové srovnávací struktury.

V praktické části se proměřují světelné zdroje v laboratoři a vyhodnocuje se věrohodnost parametrů udaných výrobcem oproti parametrům reálně změřeným. Naměřené hodnoty se dále dosazují do srovnávacího systému, díky kterému lze zdroje seřadit podle celkové ceny (pořizovací + provozní náklady), kterou za ně uživatel v konečném důsledku zaplatí.

1 ZÁKLADNÍ SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VELIČINY

Nutným předpokladem k porovnání světelných zdrojů mezi sebou je znalost světelně-technických veličin udávaných výrobcem. Z pohledu spotřebitele se rozlišuje několik základních veličin – elektrický příkon, světelný tok, měrný výkon, index podání barev, teplota chromatičnosti, střední doba života a energetická třída.



Obr. 1-1 Balení LED retrofitu s parametry [1]

1.1 Elektrický příkon

Elektrický příkon udává spotřebu elektrické energie za jednotku času. V případě světelných zdrojů zahrnuje jak výkon nutný pro svícení, tak ztráty např. v předřadných obvodech.

Značení: P

Jednotka: (W) – watt

Tab. 1-1 Obvyklé řady příkonů pro běžné domácnosti [2] [3] [4]

Světelný zdroj	P (W)
Klasické žárovky	15 – 200
Halogenové žárovky	20 – 105
Lineární zářivky	6 – 60
Kompaktní zářivky	5 – 23
Kompaktní LED retrofity	2 – 20
Lineární LED retrofity	3 – 25

1.2 Světelný tok

Světelný tok (také „světelný výkon“) označuje množství světelné energie vyzářené světelným zdrojem za časovou jednotku s přihlédnutím k citlivosti průměrného lidského oka na různé vlnové délky světla [5]. V jiné literatuře se definuje jako schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek [6].

Značení: Φ

Jednotka: (lm) – lumen

Čím větší je tedy světelný tok daného světelného zdroje, tím více energie vyzáří. Pokud spotřebitele zajímá pouze míra zářivosti daného světelného zdroje bez ohledu na ostatní parametry, je pro něj světelný tok jasným ukazatelem.

Následující tabulka informuje o světelných tocích zdrojů generovaných obvyklými řadami příkonů pro běžné domácnosti (viz tab. 1-1).

Tab. 1-2 Obvyklá škála světelných toků zdrojů pro běžné domácnosti [2] [3] [4] [7]

Světelný zdroj	Φ (lm)
Klasické žárovky	125 – 3 000
Halogenové žárovky	130 – 1 800
Lineární zářivky	270 – 5 300
Kompaktní zářivky	250 – 1 570
Kompaktní LED retrofity	190 – 2 452
Lineární LED retrofity	260 – 2 600

1.3 Měrný výkon

Měrný výkon vymezuje vztah mezi světelným tokem a elektrickým příkonem světelného zdroje. Určuje, jakou hodnotu světelného toku lze získat z jednoho wattu [6]. Jinými slovy udává účinnost přeměny elektrické energie na světlo.

Značení: M_z

Jednotka: (lm.W⁻¹) – lumen na watt

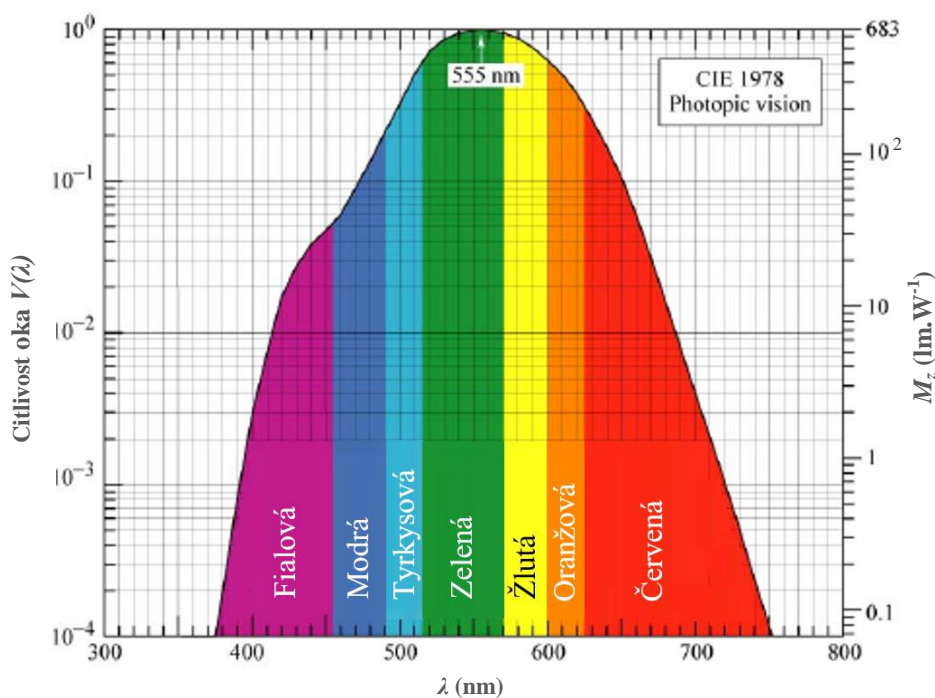
$$M_z = \frac{\Phi}{P} \quad (\text{lm.W}^{-1}) \quad (1.1)$$

U světelných zdrojů je žádoucí, aby měrný výkon byl co nejvyšší, a to nejen z ekonomického hlediska, kde uživatele zajímá provozovací cena zdroje, ale i z pohledu ekologického, který vyžaduje maximální využití přeměny elektrické energie na světelnou. S vyšším příkonem obvykle roste i hodnota měrného výkonu u světelných zdrojů stejného typu.

Tab. 1-3 Měrné výkony jednotlivých skupin světelných zdrojů [2] [3] [5] [6] [7]

Světelný zdroj	M_z (lm.W ⁻¹)
Klasické žárovky	10 – 18
Halogenové žárovky	14 – 26
Lineární zářivky	35 – 105
Kompaktní zářivky	50 – 75
Kompaktní LED retrofity	80 – 145
Lineární LED retrofity	80 – 160

Limitní a maximální dosažitelnou hodnotou měrného výkonu je 683 lm.W⁻¹, která je dána spektrální citlivostí lidského oka. Takového měrného výkonu by dosáhl monochromatický zdroj žluto-zelené barvy ($\lambda = 555$ nm), v jehož světle by ovšem nebylo možno rozeznat jednotlivé barvy osvětlovaných předmětů [6].

Obr. 1-2 Spektrální citlivost lidského oka – křivka $V(\lambda)$ [8]

1.4 Index podání barev

V předchozím odstavci byla zmínka o problematice rozeznávání barev ve světle daného zdroje. Parametrem určujícím míru rozeznání barev je tzv. index podání barev. Je bezrozměrnou veličinou, která vyjadřuje schopnost zdroje věrně zachytit barvu osvětlovaných předmětů v porovnání s denním světlem Slunce. Jeho hodnota se pohybuje mezi 0 – 100, přičemž hodnoty blízké nule vyjadřují nedostatečné podání barev a hodnoty blízké stovce maximální věrnost podání barev.

Značení: R_a (v angličtině *CRI*)

Jednotka: (-)

Pro jeho zjištění je důležité spektrální složení světla daného zdroje. Čím více barev je v daném spektru zastoupeno, tím vyšší je index podání barev [6].

Porovnání různých indexů podání barev při stejném světelném toku je zřetelné z obr. 1-3.

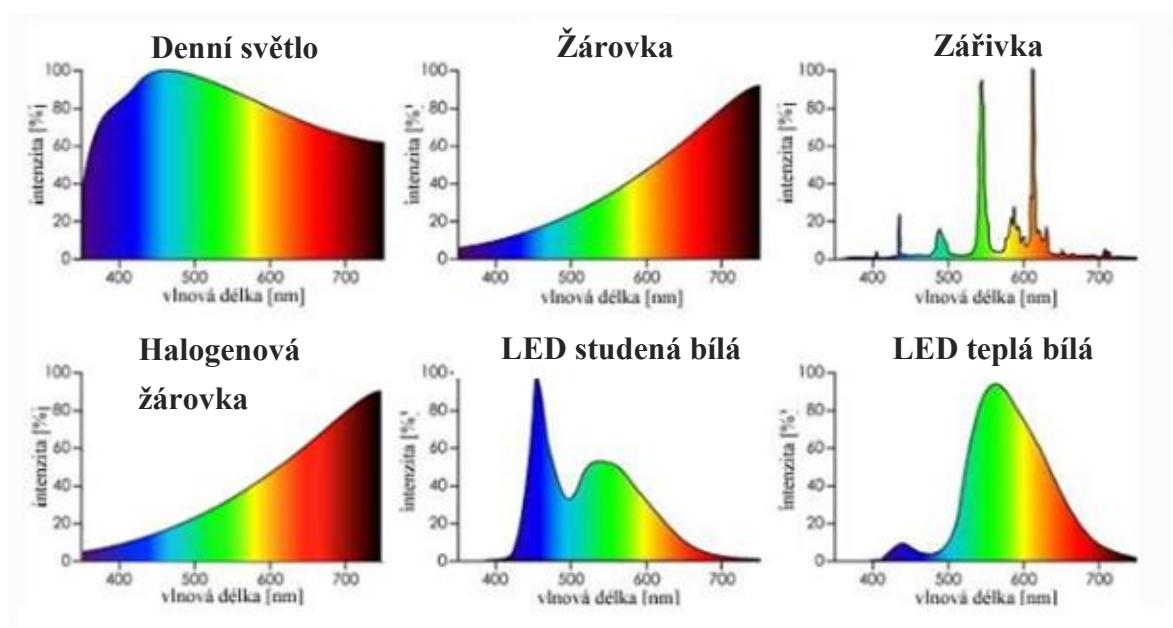


Obr. 1-3 Porovnání různých indexů podání barev [9]

V následující tabulce jsou popsány indexy podání barev pro světelné zdroje s měrnými výkony z tab. 1-3.

Tab. 1-4 Indexy podání barev jednotlivých skupin světelných zdrojů [2] [3] [5] [6] [7]

Světelný zdroj	R_a (-)
Klasické žárovky	100
Halogenové žárovky	100
Lineární zářivky	65 – 88
Kompaktní zářivky	80 – 90
Kompaktní LED retrofity	70 – 97
Lineární LED retrofity	70 – 97



Obr. 1-4 Spektrální průběhy světelných zdrojů [10]

Přestože má klasická žárovka $R_a = 100$, je z obr. 1-4 vidět, že její barevné spektrum se značně liší v porovnání s denním světlem Slunce. Index podání barev shrnuje odlišnosti spekter různých světelných zdrojů do jedné proměnné, což pak umožňuje jednoduché porovnání s ostatními zdroji mezi sebou, nicméně jedná se o popis komplexních změn jedinou proměnnou, což v konečném důsledku zanedbává značnou část informací [11].

V reakci na nedokonalosti indexu podání barev byl v roce 2017 vyvinut nový systém IES TM-30-15. Obsahuje podstatně více proměnných popisujících podání barev. Jednou z nich je R_f (Color Fidelity Index), který je vylepšeným ekvivalentem k R_a , protože odlišnosti od denního světla vyhodnocuje na vzorku 99 barev, kdežto R_a pouze na vzorku 8 barev [12].

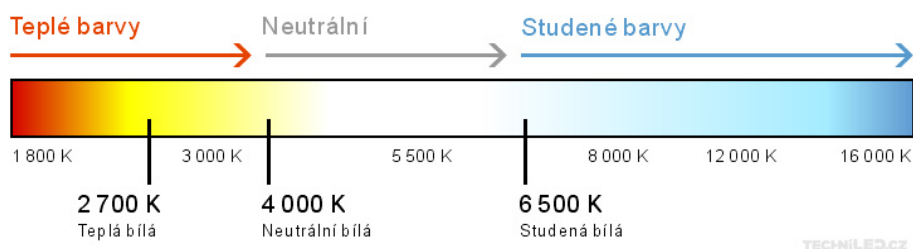
1.5 Teplota chromatičnosti

Důležitým vizuálním aspektem světla zdrojů je tzv. teplota chromatičnosti (T_c), která charakterizuje barvu světla jako ekvivalent k barvě absolutně černého tělesa zahřátého na určitou teplotu [13].

Značení: T_c , T_{cp}

Jednotka: (K) – kelvin

U světelných zdrojů, kde ke generaci světla nedochází tepelným žhavením, se používá obdobná veličina zvaná náhradní teplota chromatičnosti (T_{cp}) [13].



Obr. 1-5 Škála teplot chromatičnosti [14]

1.6 Střední doba života

Z hlediska spotřebitele je užitečné vědět, jak dlouho bude světelný zdroj schopen svítit. Tuto informaci zprostředkovává střední doba života, která vyjadřuje časový údaj, po němž bude 50 % světelných zdrojů daného typu stále schopných provozu při zachování minimálně 80 % původního světelného toku [15].

Značení: t_z

Jednotka: (h) – hodina

Tab. 1-5 Střední doby života jednotlivých skupin zdrojů

Světelný zdroj	t_z (h)
Klasické žárovky	800 – 1 000
Halogenové žárovky	2 000
Lineární zářivky	8 000 – 20 000
Kompaktní zářivky	8 000 – 12 000
Kompaktní LED retrofity	10 000 – 50 000
Lineární LED retrofity	10 000 – 50 000

1.7 Energetická třída

Energetická třída podává informaci o tom, jak úsporně daný spotřebič pracuje z hlediska účinnosti přeměny elektrické energie. Jinými slovy udává také energetickou náročnost spotřebiče. Dalším faktorem je ekologičnost výroby daných spotřebičů [16].

Označování spotřebičů energetickou třídou je povinné. Zavedla jej Evropská unie za účelem klasifikace skupin spotřebičů, pro které vydává různá nařízení a zákazy [16].



Obr. 1-6 Současné energetické třídy [17]

Vzhledem k nepřehlednému označování dnešních energetických tříd, kde převažuje písmeno „A“, dojde dle nařízení EU od 1. září 2021 ke změně štítkování zpět na klasickou stupnici (A, B, C,...) [18].

Postup výpočtu energetické třídy pro světelné zdroje

Při výpočtu současné energetické třídy světelného zdroje (do 1. září 2021) se porovnává výkon upravený o případné ztráty ovladačů světelného zdroje (P_{cor}) s jeho referenčním výkonem (P_{ref}). Referenční výkon se získá z užitečného světelného toku zdroje (Φ_{use}). Vychází se z následujících vztahů a tabulek [19]:

$$EEI = \frac{P_{cor}}{P_{ref}} \quad (-) \quad (1.2)$$

$$P_{ref} = 0,88 \cdot \sqrt{\Phi_{use}} + 0,049 \cdot \Phi_{use} \quad (W) \quad (1.3)$$

Pro $\Phi_{use} < 1\,300\text{ lm}$

$$P_{ref} = 0,07341 \cdot \Phi_{use} \quad (W) \quad (1.4)$$

Pro $\Phi_{use} \geq 1\,300\text{ lm}$

Tab. 1-6 Výkon upravený o ztráty ovladačů světelného zdroje [19]

Předmět korekce	Výkon upravený o ztráty ovladačů světelného zdroje (P_{cor})
Světelné zdroje provozované s externími předřadníky halogenových žárovek	$P_{rated} \cdot 1,06$
Světelné zdroje provozované s externími ovladači světelných zdrojů LED	$P_{rated} \cdot 1,10$
Zářivky o průměru 16 mm (zářivky T5) a čtyřkolíkové jednopaticové zářivky provozované s externími ovladači zářivek	$P_{rated} \cdot 1,10$
Jiné světelné zdroje provozované s externími ovladači zářivek	$P_{rated} \cdot \frac{0,24 \cdot \sqrt{\Phi_{use}} + 0,0103 \cdot \Phi_{use}}{0,15 \cdot \sqrt{\Phi_{use}} + 0,0097 \cdot \Phi_{use}}$
Světelné zdroje provozované s externími ovladači vysoce intenzivních výbojek	$P_{rated} \cdot 1,10$
Světelné zdroje provozované s externími ovladači nízkotlakých sodíkových výbojek	$P_{rated} \cdot 1,10$

EEI značí index energetické účinnosti a P_{rated} označuje jmenovitý výkon zdroje. Výsledná energetická třída se poté určí z tab. 1-7.

Tab. 1-7 Energetická třída v závislosti na EEI [19]

Třída energetické účinnosti ¹	Index energetické účinnosti (EEI) pro nesměrové světelné zdroje	Index energetické účinnosti (EEI) pro směrové světelné zdroje ²
A++	$EEI \leq 0,11$	$EEI \leq 0,13$
A+	$0,11 < EEI \leq 0,17$	$0,13 < EEI \leq 0,18$
A	$0,17 < EEI \leq 0,24$	$0,18 < EEI \leq 0,40$
B	$0,24 < EEI \leq 0,60$	$0,40 < EEI \leq 0,95$
C	$0,60 < EEI \leq 0,80$	$0,95 < EEI \leq 1,20$
D	$0,80 < EEI \leq 0,95$	$1,20 < EEI \leq 1,75$
E	$EEI > 0,95$	$EEI > 1,75$

¹ Tyto metody výpočtu byly ustanoveny v roce 2012, kdy se ještě nevyskytovaly zdroje energetické třídy A+++.

² „Směrovým světelným zdrojem“ se rozumí světelný zdroj s alespoň 80 % světelného výkonu v rozmezí prostorového úhlu π sr (odpovídá kuželu s úhlem 120°).

Nové energetické třídy zdrojů (stupnice A, B, C,... vycházející v platnost od 1. září 2021) se určí jednodušším způsobem na základě celkového síťového měrného výkonu η_{TM} podle vztahu:

$$\eta_{TM} = \frac{\Phi_{use}}{P_{on}} \cdot F_{TM} \quad (\text{lm.W}^{-1}) \quad (1.5)$$

kde Φ_{use} = deklarovaný užitečný světelný tok (lm)

P_{on} = deklarovaný elektrický příkon v zapnutém stavu (W)

F_{TM} = činitel pro výpočet určený z tab. 1-8 (-)

Výsledná energetická třída se poté určí z tab. 1-9 [20].

Tab. 1-8 Činitele F_{TM} dle typu světelného zdroje [20]

Typ světelného zdroje	F_{TM} (-)
Nesměrový (NDLS) síťový (MLS)	1,000
Nesměrový (NDLS) nesíťový ³ (NMLS)	0,926
Směrový (DLS) síťový (MLS)	1,176
Směrový (DLS) nesíťový (NMLS)	1,089

Tab. 1-9 Energetická třída světelných zdrojů v závislosti na η_{TM} [20]

Třída energetické účinnosti	η_{TM} (lm.W ⁻¹)
A	$210 \leq \eta_{TM}$
B	$185 \leq \eta_{TM} < 210$
C	$160 \leq \eta_{TM} < 185$
D	$135 \leq \eta_{TM} < 160$
E	$110 \leq \eta_{TM} < 135$
F	$85 \leq \eta_{TM} < 110$
G	$\eta_{TM} < 85$

Z uvedeného vyplývá, že v budoucnu se počítá s dalším vývojem a zlepšováním parametrů světelných zdrojů, jelikož v současnosti poměrně vysoký měrný výkon 85 lm.W⁻¹ bude podle tab. 1-9 hraničit s nejnižší možnou energetickou třídou.

³ Nesíťový světelný zdroj na rozdíl od síťového potřebuje samostatný předřadný přístroj, který není ve světelném zdroji fyzicky zabudován, aby mohl být připojen do elektrické sítě.

2 SVĚTELNÉ ZDROJE

Tato kapitola rozebírá jednotlivé typy světelných zdrojů využívané pro svícení v domácnosti, jejich princip, strukturu, parametry, výhody a nevýhody.

Podle mechanismu vzniku světla lze zdroje klasifikovat do tří různých skupin: teplotní, výbojové a elektroluminiscenční světelné zdroje [6].

2.1 Teplotní světelné zdroje

Do této skupiny se řadí veškeré zdroje, u nichž dochází k určitému ohřevu těles. Přírodními teplotními zdroji jsou všechny druhy plamene (oheň, svíčky, louče, olejové a petrolejové lampy, atd.) a mimo jiné také Slunce [6].

Principem funkce elektrických teplotních světelných zdrojů je průchod elektrického proudu odporovým (nejčastěji wolframovým) vláknem. Vláknem se nažhívá na vysokou teplotu v rozmezí 2 700 – 3 300 K a emituje přitom světlo. Představiteli této skupiny jsou klasické a halogenové žárovky [5].

Výhody teplotních zdrojů [6]:

- + Obsahují spojité spektrum všech barev se zvýšeným podílem červené a infračervené oblasti, která je charakteristická pro teplotní zářiče
- + Nepotřebují předřadné obvody – připojují se přímo na síťové napětí
- + Jednoduchý provoz a snadná výměna vadných zdrojů
- + Jednoduchá konstrukce, malé rozměry a hmotnost
- + Rychlý start bez blikání, stabilní svícení bez mihání a okamžitá stabilizace světelného toku po připojení na síť
- + Snadná likvidace – neobsahují žádné zdraví škodlivé látky
- + Mají široký rozsah provozních teplot
- + Libovolná poloha svícení
- + Nízká pořizovací cena

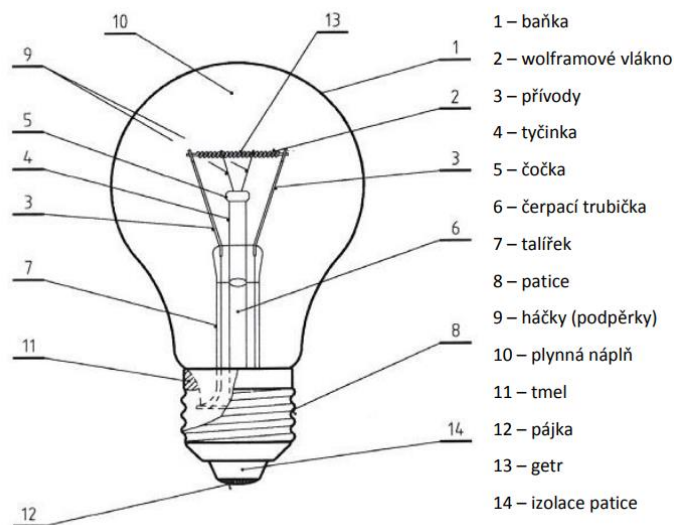
Nevýhody teplotních zdrojů [5] [6]:

- Velmi nízký měrný výkon
- Krátká střední doba života způsobena odpařováním wolframového vlákna a jeho následným přerušením
- Značný pokles světelného toku během života
- Závislost parametrů (zejména doby života) na napájecím napětí

2.1.1 Klasická žárovka

Obyčejné žárovky jsou jedním z nejstarších elektrických zdrojů světla patentovanými již v roce 1879 Thomasem A. Edisonem. Mají nejjednodušší konstrukci a funkci svícení, na druhou stranu téměř veškerou (90 – 95 %) dodávanou elektrickou energii přeměňují v teplo [5] [6].

Struktura klasických žárovek je patrná z obr. 2-1.



Obr. 2-1 Struktura klasické žárovky [21]

Spirálové wolframové vlákno má tloušťku 10 – 120 μm . Výplň baňky tvoří vakuum či inertní plyn (argon, nebo krypton) [6]. Žárovky se běžně vyráběly v řadě příkonů 15 – 200 W, výjimečně i 300 a 500 W. Na trhu se obvykle vyskytovaly žárovky se závitovými paticemi E27, E14 či B22d, ve výjimečných případech i E40 [2].

Ceny žárovek se v dnešní době pohybují od 10 do 50 Kč (příkony v desítkách wattů) a řadí tak žárovky mezi nejlevnější zdroje světla co se týče pořizovacích nákladů [2].

Podíl žárovek na celkovém množství světelných zdrojů na světě postupně klesá, jelikož jsou vytlačovány energeticky účinnějšími zdroji (zejména LED retrofity) [6].

1. září 2012 byl vydán zákaz výroby a dovozu všech klasických žárovek jako světelných zdrojů v zemích EU. Obchodníci měli povoleno pouze doprodat naskladněné kusy. Jeden z občanů ČR však našel řešení, jak zákon obejít. Nechal si žárovku zaregistrovat na úřadě pro průmyslové vlastnictví jako tepelné tělísko. Výrobci pak využili stejné fínty a záměrně doplnili na krabičku s žárovkou upozornění, že žárovka není určena pro osvětlování v domácnostech, nýbrž pro použití v průmyslu. Na dnešním trhu mají tedy stále své místo [22].

Klasické žárovky mají potenciál ke zvýšení efektivity, a to v případě, že by se do budoucna vyvinul takový materiál vnější baňky, jenž by dokázal ideálně 100% propouštět světlo a 100% odrážet teplo. Infračervené tepelné záření by se tak vrátilo zpět, vlákno by jej pohltilo a znovu vyzářilo energii ve formě viditelného záření. V minulosti tato snaha vedla k měrnému výkonu žárovek až 45 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ v laboratorním prostředí. Teoreticky by mohl pomocí zmíněné technologie měrný výkon dosáhnout limitní hodnoty až 270 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ [23].

Tab. 2-1 Parametry klasických žárovek [6]

Veličina	Hodnota
$M_z (\text{lm}\cdot\text{W}^{-1})$	10 – 18
$R_a (-)$	100
$T_c (\text{K})$	2 700 – 2 900
$t_z (\text{h})$	800 – 1 000

2.1.2 Halogenová žárovka

Oproti klasickým mají halogenové žárovky baňku plněnou halogenovým plynem (bromem nebo jódem). Vyrábí se z křemenného či tvrdého skla, které má vyšší tepelnou a mechanickou odolnost. To umožňuje zkrátit vzdálenost mezi baňkou a vláknem a výrazně tak zmenšit rozměry žárovky. Baňka pak odolává vyšší provozní teplotě (minimálně 250 °C). Zároveň dochází ke zvýšení tlaku v baňce, což zpomaluje proces vypařování wolframového vlákna. Díky tomu lze zvýšit provozní teplotu vlákna nad 3 000 K a docílit tak vyššího měrného výkonu a účinnosti [6].

Halogenové žárovky určené pro domácí osvětlení mají ještě přídatnou baňku, která zajišťuje kompaktní formu klasické žárovky a zároveň chrání uživatele před popálením (viz obr. 2-3) [6].

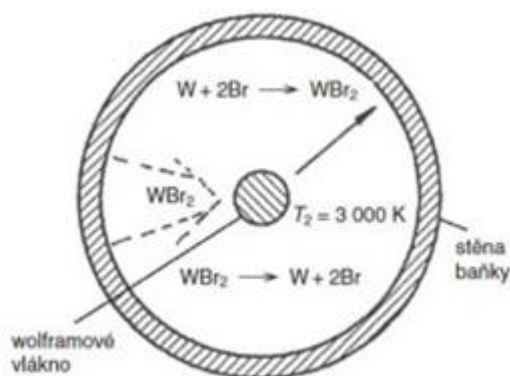


Obr. 2-2 Halogenová autožárovka [24]



Obr. 2-3 Halogenová žárovka s přídatnou baňkou [25]

Důležitým dějem charakteristickým pro halogenové žárovky je tzv. halogenový cyklus (viz obr. 2-4).



Obr. 2-4 Halogenový cyklus [26]

V první fázi dochází k vypařování wolframu při provozní teplotě kolem 3 000 K. Výpary postupují od vlákna ke stěnám baňky, čímž se ochlazují a při teplotě pod 1 700 K se slučují s okolním halogenem (zde bromem). Vzniklá sloučenina difunduje zpět k vláknu, kde se při překročení teploty 1 700 K opět rozdělí na wolfram a daný halogen. Wolfram se usadí zpět na vlákno a halogenový plyn se dále účastní reakcí s jinými výpary wolframu [6].

Tímto způsobem se zvyšuje tlak par na wolframové vlákno, což snižuje jeho tendenci vypařovat se. Výsledkem je dvojnásobná životnost oproti klasickým žárovkám [6].

Nevýhodou těchto zdrojů je náročnější technologie výroby a s tím související vyšší pořizovací cena (v rozmezí od 20 do 100 Kč pro příkony v desítkách wattů) [2].

Od 1. září 2018 platí v zemích EU zákon, jenž zakazuje vyrábět a dovážet halogenové žárovky energetické třídy C a horší z důvodu nízké energetické účinnosti těchto zdrojů. Na trhu probíhá nyní pouze doprodej naskladněných kusů. Výjimku tvoří halogenové žárovky určené ke směrovému osvětlení (světlomety aut) [27].

Tab. 2-2 Parametry halogenových žárovek [5] [6]

Veličina	Hodnota
M_z (lm.W ⁻¹)	14 – 26
R_a (-)	100
T_c (K)	3 000 – 3 300
t_z (h)	2 000

2.2 Výbojové světelné zdroje

Mechanismem vzniku záření výbojových zdrojů je průchod elektrického proudu tzv. ionizovaným plynem. Podle způsobu vzniku výboje se pak tyto zdroje klasifikují do různých skupin. Předmětem této práce jsou světelné zdroje pro interiérové použití, kde se užívají zejména lineární a kompaktní zářivky. Odborně se nazývají nízkotlaké rtuťové výbojky.

Doutnavý výboj probíhá v zářivkách za sníženého tlaku (jednotky až stovky pascalů) v nasycených párách rtuti smíšené s inertním plynem. Inertní plyn chrání vnitřní elektrody a usnadňuje zapálení výboje ve studeném stavu. Nejčastěji se používá buď samotný argon, nebo směs argonu s kryptonem [6].

Nasycené páry rtuti generují UV záření ($\lambda_1 = 185$ nm, $\lambda_2 = 254$ nm), které se průchodem přes luminofor mění na viditelné světlo. Nejčastěji bývají na vnitřní stranu trubice nanášeny 3 vrstvy luminoforu za účelem kvalitního podání barev.

Výhody nízkotlakých rtuťových výbojek [5] [6]:

- + Výrazně vyšší měrný výkon oproti žárovkám
- + Poměrně nízká cena zdrojů
- + Několikanásobná střední doba života v porovnání s žárovkami
- + Široká škála náhradních teplot chromatičnosti
- + Rozsáhlý sortiment příkonů

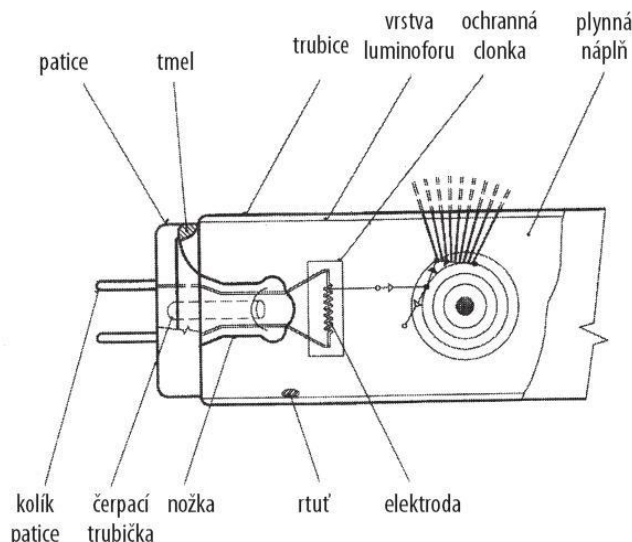
Nevýhody nízkotlakých rtuťových výbojek [6]:

- Nutnost ekologické likvidace kvůli obsahu toxické rtuti
- Používají předřadné obvody – elektronické či indukční předřadníky
- Výrazná závislost střední doby života na počtu spínání během dne. Počítá se s 8 sepnutími za den na 100% životnost. Při spínání 30krát za den klesá životnost k 50 %⁴.
- Závislost světelného toku na teplotě okolního prostředí (při teplotě 20 °C dosahuje 100% světelného toku, při teplotě okolí 5 °C pouze 75% generovaného světelného toku)

⁴ Jedná se o výbojky s indukčním předřadníkem. U zářivek s elektronickým předřadníkem je životnost při daném spínání vyšší.

2.2.1 Lineární zářivka

Lineární zářivky patří mezi nejčastěji používané zdroje osvětlení kanceláří, škol, administrativních budov, obchodů, restaurací, společenských místností atd. V současné době jsou nicméně pomalu vytlačovány lineárními LED retrofity, které se z pohledu parametrů zdroje jeví výhodnější.



Obr. 2-5 Konstrukce lineární zářivky [28]

Ceny lineárních zářivek se u běžně používaných příkonů (6 – 60 W) pohybují většinou v rozmezí 40 – 250 Kč [2] [3] [4] [7]. Vyrábí se v širokém sortimentu příkonů 4 – 200 W. Na trhu jsou dostupné provedení s paticemi G5 a G13 s průměry T5, T8 a T12 [2] [3] [6].

Tab. 2-3 Parametry lineárních zářivek [6]

Veličina	Hodnota
M_z^5 (lm.W ⁻¹)	35 – 105
R_a (-)	65 – 88
T_{cp} (K)	2 700 – 17 000
t_z (h)	8 000 – 20 000

2.2.2 Kompaktní zářivka

Kompaktní zářivky vznikly za účelem nahradit klasické žárovky účinnějším zdrojem světla. Často jsou také nesprávně označovány jako „úsporné žárovky“. Mechanismus vzniku světla je stejný jako u lineárních zářivek. Došlo zde pouze ke změně tvaru trubice z rovné na různě zahnutou či zalomenou.

⁵ Široký interval měrného výkonu zapříčiňuje pokrok ve vývoji zářivek. Prvotní zářivky s indukčním předřadníkem se řadí spíše k dolní hranici měrných výkonů (35 lm.W⁻¹), nejvyspělejší zářivky s elektronickým předřadníkem naopak k horní hranici (105 lm.W⁻¹).

Nevýhodou kompaktních zářivek oproti lineárním je nižší měrný výkon. Blízké umístění různých úseků trubice vedle sebe způsobuje nárůst provozní teploty výboje vlivem vyšší koncentrace tepla v okolí trubice a horšího chlazení. Vyšší provozní teplota pak vede ke generaci nižšího světelného toku, což v konečném důsledku snižuje i měrný výkon.

Jedno z častých provedení kompaktních zářivek (tzv. spirálové) ukazuje obr. 2-6.



Obr. 2-6 Spirálová kompaktní zářivka [29]

Příkon obvykle nepřesahuje hodnotu 23 W [2] [4] [7]. Ceny se pro příkony do 23 W obvykle pohybují v intervalu 30 – 140 Kč [2] [3] [4] [7]. Vyrábí se v provedení s paticemi E14, E27, E40, G9, G23, GR10Q, GX24Q, GX24D, GR8, GU10, 2G7, R7s, B22D a dalšími [2] [3] [6] [7].

Tab. 2-4 Parametry kompaktních zářivek [2] [3] [6]

Veličina	Hodnota
M_z (lm.W ⁻¹)	50 – 75
R_a (-)	80 – 90
T_{cp} (K)	2 700 – 6 500
t_z (h)	8 000 – 12 000

2.3 Elektroluminiscenční světelné zdroje

Základním konceptem vzniku světla v elektroluminiscenčních zdrojích je generace záření vlivem rekombinace elektronů a děr v PN přechodu polovodičového materiálu. Vlnová délka záření závisí na energii, kterou nabyde uvolněný foton při rekombinaci páru elektron-díra. Z toho vyplývá, že změnou materiálu PN přechodu lze měnit vlnovou délku vyzářeného světla.

Tato práce se zabývá výhradně kompaktními LED retrofity a lineárními LED retrofity používanými pro domácí osvětlení.

Výhody LED:

- + Nejvyšší měrný výkon v rozpětí 80 – 160 lm.W⁻¹ s indexem podání barev v rozmezí 70 – 97 [2] [30]
- + Nejvyšší střední doba života v rozpětí 10 000 – 50 000 hodin
- + Počet sepnutí neovlivňuje životnost LED
- + Žádný negativní vliv na životní prostředí ani během provozu, ani po vypršení životnosti (významná část materiálů je recyklovatelná)

Nevýhody LED:

- Vyšší cena [2] [30] [31] [32]:
 - Kompaktní LED retrofity energetické třídy A++ s $M_z \geq 100 \text{ lm.W}^{-1}$ mají cenu v rozmezí 100 – 200 Kč za kus (u příkonů do 12 W)
 - Lineární LED retrofity energetické třídy A+ s $M_z = 80 - 100 \text{ lm.W}^{-1}$ mají cenu v rozmezí 100 – 300 Kč za kus (u příkonů do 25 W)
 - Nejefektivnější lineární LED retrofity energetické třídy A++ s $M_z = 160 \text{ lm.W}^{-1}$ mají cenu v rozmezí 350 – 800 Kč za kus (u příkonů do 22 W)
- Závislost střední doby života a světelného toku na teplotě

Tab. 2-5 Parametry kompaktních a lineárních LED retrofitů [2] [6] [30] [31]

Veličina	Hodnota
$M_z (\text{lm.W}^{-1})$	80 – 160
$R_a (-)$	70 - 97
$T_{cp} (\text{K})$	2 500 – 10 000
$t_z (\text{h})$	10 000 – 50 000

2.3.1 Kompaktní LED retrofit

Kompaktní LED retrofity se vyrábí v mnoha typech a provedeních imitujících klasické či halogenové žárovky. Nejčastějším typem je zdroj s paticí E27 a neprůhledným difuzorem (viz obr. 2-7).



Obr. 2-7 Kompaktní LED retrofit [33]

Mimo něj se vyskytují LED s paticemi E10, E14, E40, B22, R7S, G4, G9, G24, GU10 a GU5,3. Příkony kompaktních LED prodávaných u obchodníků obvykle nepřevyšují hodnotu 20 W a jejich měrný výkon dosahuje hodnoty až 145 lm.W^{-1} [2] [7] [30].

2.3.2 Lineární LED retrofit

Postupem času se na trhu rozrůstá nová skupina zdrojů – tzv. lineární LED retrofity, často hovorově označované jako „LED žárovky“. Tak jako „LED žárovky“ nahrazují žárovky klasické, stejně i „LED žárovky“ nahrazují klasické lineární žárovky.

Tento typ zdroje dosahuje prozatím nejvyššího měrného výkonu dostupného na trhu o hodnotě až 160 lm.W^{-1} [31] [32]. Čipy v lineárních LED retrofitech jsou od sebe oproti kompaktním LED retrofitům více vzdálené, čímž se lépe chladí. Dosahují tak nižší provozní teploty, díky čemuž mohou mít i vyšší měrný výkon.



Obr. 2-8 Lineární LED retrofit [34]

Vyrábí se v provedení s paticemi G5 (pro průměr T5), G13 (pro průměr T8) a S14D. Příkon lineárních LED retrofitů většinou nepřesahuje hodnotu 25 W [2] [30].

3 EKONOMICKÁ ČÁST

Tato kapitola zkoumá vztahy pro výpočet ekonomické výhodnosti a porovnání dříve popsanych světelných zdrojů. Spotřebitel má pak jasnou informaci o tom, jaký zdroj pro něj bude z hlediska investice nejvhodnější.

3.1 Univerzální metoda

Výpočty vycházejí z následujících základních parametrů [35]:

• Pořizovací cena světelného zdroje	$N_{xpoř}$ (Kč)
• Celkový příkon	P (kW)
• Světelný tok	Φ (lm)
• Střední doba života	t_z (h)
• Index podání barev	R_a (-)

Veškeré uvedené parametry lze najít v datasheetu daného zdroje světla.

Měrnou jednotkou, na kterou se pak vztahuje celková cena světelného zdroje, je celkové světelné množství zdroje m_Φ .

$$m_\Phi = \Phi \cdot t_z \quad (\text{lm} \cdot \text{h}) \quad (3.1)$$

$$m_\Phi = \frac{\Phi \cdot t_z}{10^6} \quad (\text{Mlm} \cdot \text{h}) \quad (3.2)$$

Cena za provoz světelného zdroje za dobu života N_{xel} se spočítá podle vztahu:

$$N_{xel} = A \cdot (P + \Delta P) \cdot t_z \cdot 10^{-3} \quad (\text{Kč}) \quad (3.3)$$

kde A = průměrná cena elektrické energie za 1 kWh $[\text{Kč} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$

ΔP = elektrické ztráty zdroje (předřadných obvodů) (W)

Většina domácností využívá jednotarifní distribuční sazbu. Pro veškeré výpočty tak byla vybrána konstantní cena elektrické energie pro sazbu D01d ve vysokém tarifu z ceníku E.ON na rok 2020, která činí $5,233 \text{ Kč} \cdot (\text{kWh})^{-1}$ [42].

Za účelem zohlednění kvality podání barev daného světelného zdroje se zavádí dohodnutý koeficient k_1 , který promítne jakost barev do ceny za provoz světelného zdroje. Vznikl speciálně pro účely této práce a v jiných materiálech se nevyskytuje.

$$k_1 = \frac{100}{R_a} \quad (-) \quad (3.4)$$

Pro zdroje běžně používané na osvětlování domácností⁶ zpravidla platí, že $R_a \geq 65$, z čehož plyne:

$$k_1 \in \left\langle \frac{100}{100}; \frac{100}{65} \right\rangle$$

$$k_1 \in \langle 1; 1,538 \rangle$$

Modifikovaná cena za provoz zdroje za dobu života N_{el} se pak spočte jako:

$$N_{el} = N_{xel} \cdot k_1 \quad (\text{Kč}) \quad (3.5)$$

$$N_{el} = A \cdot (P + \Delta P) \cdot t_z \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{R_a} \quad (\text{Kč}) \quad (3.6)$$

Vlivem zdrojů s přepínatelnými režimy náhradních teplot chromatičnosti či regulovatelným světelným tokem se zavádí další dva koeficienty k_2 a k_3 . Pomocí nich dochází ke snížení pořizovací ceny zdroje, aby se zohlednil fakt, že jeden fyzický světelný zdroj v sobě obsahuje více integrovaných světelných zdrojů. Dané koeficienty opět vznikly pouze pro účely této práce.

$$k_2 = \frac{1}{x} \quad (-) \quad (3.7)$$

$$k_3 = \frac{1}{y} \quad (-) \quad (3.8)$$

kde x = počet přepínatelných barevných režimů (-)

$y = 1 \rightarrow$ pokud světelný zdroj nemůže regulovat světelný tok

$y = 2 \rightarrow$ pokud světelný zdroj může regulovat světelný tok

Pomocí zmíněných koeficientů lze vypočítat modifikovanou pořizovací cenu světelného zdroje $N_{poř}$ dle vztahu:

$$N_{poř} = N_{xpoř} \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (\text{Kč}) \quad (3.9)$$

$$N_{poř} = N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} \quad (\text{Kč}) \quad (3.10)$$

Celkové náklady na světelný zdroj N_{cel} jsou potom:

$$N_{cel} = N_{poř} + N_{el} \quad (\text{Kč}) \quad (3.11)$$

$$N_{cel} = N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} + A \cdot (P + \Delta P) \cdot t_z \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{R_a} \quad (\text{Kč}) \quad (3.12)$$

⁶ Pro světelné zdroje jiného typu, např. vysokotlaké a nízkotlaké sodíkové výbojky nebo monochromatické zdroje s $R_a \leq 25$ by tento koeficient výrazně zkresloval celkové náklady za provoz světelného zdroje, protože by narostl do gigantických čísel.

Finálním ukazatelem pro finanční porovnání světelných zdrojů jsou náklady na produkci jednotkového světelného množství N_Φ . Čím má tento ukazatel nižší hodnotu, tím je daný světelný zdroj z ekonomického hlediska výhodnější.

$$N_\Phi = \frac{N_{cel}}{m_\Phi} \quad [\text{Kč} \cdot (\text{lm} \cdot \text{h})^{-1}] \quad (3.13)$$

$$N_\Phi = \frac{N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} + A \cdot (P + \Delta P) \cdot t_z \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{R_a}}{\frac{\Phi \cdot t_z}{10^6}} \quad [\text{Kč} \cdot (\text{Mlm} \cdot \text{h})^{-1}] \quad (3.14)$$

Tab. 3-1 Příklady nákladů na produkci světelného množství jednotlivých zdrojů [36] [37] [38] [39] [40] [41]

Světelný zdroj ⁷	N_Φ [Kč.(Mlm.h) ⁻¹]
Klasická žárovka	537,37
Halogenová žárovka	379,46
Lineární zářivka	84,41
Kompaktní zářivka	112,89
Kompaktní LED retrofit	56,63
Lineární LED retrofit	49,97

Přepočet nákladů na konkrétní hodnoty požadovaného světelného toku Φ_R a doby svícení t_R vyjadřuje veličina N – celkové vynaložené náklady na svícení.

$$N = N_\Phi \cdot \Phi_R \cdot t_R \quad (\text{Kč}) \quad (3.15)$$

Při požadavku osvětlení místnosti světelným tokem $\Phi_R = 1\,000$ lm po dobu $t_R = 10\,000$ h ukazuje tab. 3-2 hodnoty celkových nákladů N pro zdroje z tab. 3-1.

Tab. 3-2 Konkrétní náklady na světelné zdroje

Světelný zdroj	N (Kč)
Klasická žárovka	5 374
Halogenová žárovka	3 795
Lineární zářivka	844
Kompaktní zářivka	1 129
Kompaktní LED retrofit	566
Lineární LED retrofit	500

⁷ Ve výpočtech vedoucích k hodnotám v tabulce se zanedbává ztrátový výkon ΔP , který nelze vyčíst z datasheetů jednotlivých světelných zdrojů a musel by se zjistit experimentálně.

3.2 Metoda po krocích

Tato metoda nabízí velmi názorný postup, jak spočítat celkové náklady pro zadané parametry (čas svícení a potřebný světelný tok) pro určitou danou sadu světelných zdrojů. V podstatě se jedná o stejný postup jako v kapitole 3.1, nicméně nabízí více detailů a přehlednější srovnání světelných zdrojů. Obě metody vedou ke shodným výsledkům [43].

Uvažujme případ, kdy chceme vědět, kolik bude stát osvětlit místnost světelným tokem $\Phi_R = 1\,000\text{ lm}$ po dobu stálého svícení $t_R = 10\,000\text{ h}$. K dispozici jsou světelné zdroje z tab. 3-3.

Tab. 3-3 Srovnávané světelné zdroje [36] [37] [38] [39] [40] [41]

Světelný zdroj	P (W)	Φ (lm)	t_z (h)	R_a (-)	$N_{xpoř}$ (Kč)
Klasická žárovka	40	410	1 000	100	11
Halogenová žárovka	42	624	2 000	100	34
Lineární zářivka	30	2 400	20 000	80	127
Kompaktní zářivka	14	850	8 000	80	35
Kompaktní LED retrofit	20	2 452	30 000	80	241
Lineární LED retrofit	18	2 520	50 000	80	409

Tab. 3-4 Referenční hodnoty

Referenční Φ_R (lm)	1 000
Referenční t_R (h)	10 000
A [$\text{Kč} \cdot (\text{kWh})^{-1}$] [42]	5,233

První veličinou k určení je počet kusů Σ , který bude potřeba k pokrytí referenčního světelného toku Φ_R .

$$\Sigma = \frac{\Phi_R}{\Phi} \quad (-) \quad (3.16)$$

Celkový příkon P_c této sady zdrojů se vypočítá pomocí příkonu P světelného zdroje dostupného z datasheetu.

$$P_c = P \cdot \Sigma \quad (\text{W}) \quad (3.17)$$

Potřebný počet sad n k pokrytí referenční doby svícení t_R se dále vyjádří ze zadané střední doby života t_z jako:

$$n = \frac{t_R}{t_z} \quad (-) \quad (3.18)$$

Z výše spočtených veličin se pak vypočítá celkový počet kusů Σ_c nutných k nepřetržitému svícení po dobu t_R .

$$\Sigma_c = n \cdot \Sigma \quad (-) \quad (3.19)$$

Modifikovaná pořizovací cena světelného zdroje $N_{poř}$ se určí pomocí koeficientů k_2 a k_3 z rovnic (3.7) a (3.8) a pořizovací ceny za světelný zdroj $N_{xpoř}$.

$$N_{poř} = N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} \quad (-) \quad (3.20)$$

Modifikované pořizovací náklady $N_{nákup}$ celkového počtu kusů Σ_c lze určit pomocí modifikované pořizovací ceny světelného zdroje $N_{poř}$.

$$N_{nákup} = \Sigma_c \cdot N_{poř} \quad (\text{Kč}) \quad (3.21)$$

Náklady na provoz $N_{xprovoz}$ pro Σ_c světelných zdrojů za dobu svícení t_R se vypočtou z odebírané elektrické energie ze sítě a její průměrné ceny A .

$$N_{xprovoz} = P_c \cdot 10^{-3} \cdot t_R \cdot A \quad (\text{Kč}) \quad (3.22)$$

Pomocí zavedeného koeficientu k_1 z rovnice (3.4) lze spočítat modifikované náklady na provoz N_{provoz} :

$$N_{provoz} = N_{xprovoz} \cdot k_1 \quad (\text{Kč}) \quad (3.23)$$

$$N_{provoz} = P_c \cdot 10^{-3} \cdot t_R \cdot A \cdot \frac{100}{R_a} \quad (\text{Kč}) \quad (3.24)$$

Celkové vynaložené náklady N se pak spočtou prostým součtem modifikovaných pořizovacích nákladů $N_{nákup}$ a modifikovaných nákladů na provoz zdrojů N_{provoz} . Výsledek se poté zaokrouhlí na celé číslo.

$$N = N_{nákup} + N_{provoz} \quad (\text{Kč}) \quad (3.25)$$

$$N = \Sigma_c \cdot N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} + P_c \cdot 10^{-3} \cdot t_R \cdot A \cdot \frac{100}{R_a} \quad (\text{Kč}) \quad (3.26)$$

Tab. 3-5 Srovnávané veličiny světelných zdrojů

Světelný zdroj	Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{nákup}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
Klasická žárovka	2,44	97,6	10,00	24,39	268,3	5 105,4	5 374
Halogenová žárovka	1,60	67,3	5,00	8,01	272,4	3 522,2	3 795
Lineární zářivka	0,42	12,5	0,50	0,21	26,5	817,7	844
Kompaktní zářivka	1,18	16,5	1,25	1,47	51,5	1 077,4	1 129
Kompaktní LED retrofit	0,41	8,2	0,33	0,14	32,8	533,5	566
Lineární LED retrofit	0,40	7,1	0,20	0,08	32,5	467,2	500

Σ = počet kusů v sadě na referenční tok Φ_R

P_c = celkový příkon sady

n = počet sad potřebný k pokrytí doby svícení t_R

Σ_c = celkový počet kusů

$N_{nákup}$ = modifikované pořizovací náklady za Σ_c zdrojů

N_{provoz} = modifikované náklady na provoz Σ_c zdrojů za dobu svícení t_R

N = celkové náklady za svícení po dobu t_R světelným tokem Φ_R

Tab. 3-5 shrnuje veškeré vypočtené veličiny dle dříve zmíněných vztahů. Je z ní patrné, že pro delší časové intervaly svícení (10 000 h) modifikované náklady na provoz N_{provoz} značně převyšují modifikované pořizovací náklady zdrojů $N_{nákup}$. Rozdíl mezi těmito částkami určuje ve značné míře měrný výkon M_z světelných zdrojů, který by měl být hlavním faktorem při výběru světelného zdroje.

Při podrobnějším pohledu na údaje v tabulce lze pozorovat, že se ve výpočtech uvažuje možnost využívat pouze část světelného toku zdrojů (sloupec Σ v tab. 3-5). Ve skutečnosti ovšem lze využívat světelný zdroj buď naplno, nebo vůbec. Proto čím menší je referenční tok Φ_R , tím méně přesné jsou ekonomické výpočty s ním spojené.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem této části je ekonomické zhodnocení konkrétních světelných zdrojů proměřených v laboratoři světelné techniky FEKT VUT. Dále se také porovnávají parametry zdrojů udávané výrobcem a reálně změřené hodnoty těchto parametrů. Záměrem je ověřit věrohodnost jednotlivých výrobců světelných zdrojů.

4.1 Měření světelných zdrojů

Pro měření bylo vybráno několik typických představitelů z jednotlivých skupin světelných zdrojů využívaných pro domácí osvětlení (s výjimkou lineárních zářivek a lineárních LED retrofitů). Informace od výrobců o vybraných kusech ukazují tab. 4-1, tab. 4-2 a tab. 4-3.

Tab. 4-1 Parametry LED retrofitů udané výrobcem [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53]

Světelný zdroj	T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	R_a (-)	t_z (h)	$N_{xpoř}$ (Kč)
LED Flair 6 W	2 700	6,0	810	135,0	80	15 000	89
EMOS LED 8 W teplá bílá	2 700	8,0	1 060	132,5	80	25 000	119
EMOS LED 8 W studená bílá	6 500	8,0	1 060	132,5	80	25 000	89
OSRAM LED 8,5 W teplá bílá	2 700	8,5	806	94,8	80	10 000	69
OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá	4 000	8,5	806	94,8	80	10 000	69
OSRAM LED 8,5 W studená bílá	6 500	8,5	806	94,8	80	10 000	69
CENTURY LED 10 W teplá bílá	2 700	10,0	1 521	152,1	80	25 000	179
CENTURY LED 10 W neutrální bílá	4 000	10,0	1 521	152,1	80	25 000	179
LED Megaman 11 W teplá bílá	2 800	11,0	1 055	95,9	80	15 000	86
LED Megaman 11 W neutrální bílá	4 000	11,0	1 055	95,9	80	15 000	86
LED Megaman 11 W studená bílá	6 500	11,0	1 055	95,9	80	15 000	86
LED Livarnolux 19 W	2 700	19,0	1 600	84,2	98	25 000	79

Tab. 4-2 Parametry světelných zdrojů udané výrobcem [54] [55] [56] [57] [58] [59] [60]

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	T_c, T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	R_a (-)	t_z (h)	$N_{xpoř}$ (Kč)
Klasická žárovka	TECHLAMP 40 W	-	40,0	420	10,5	-	1 000	20
	TECHLAMP 60 W	-	60,0	710	11,8	-	1 000	20
	TECHLAMP 75 W	-	75,0	940	12,5	-	1 000	20
Halogenová žárovka	EMOS lighting 42 W	2 700	42,0	630	15,0	99	2 000	79
	EMOS lighting 53 W	2 700	53,0	840	15,8	99	2 000	79
	EMOS lighting 70 W	2 700	70,0	1 300	18,6	99	2 000	79
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá	2 700	12,0	650	54,2	80	10 000	86
	OSRAM Dulux 12 W studená bílá	6 500	12,0	650	54,2	80	10 000	86
	OSRAM Dulux 15 W teplá bílá	2 700	15,0	840	56,0	80	6 000	91
	OSRAM Dulux 15 W studená bílá	6 500	15,0	800	53,3	80	6 000	91
	OSRAM Dulux 23 W teplá bílá	2 700	23,0	1 520	66,1	80	6 000	109
	OSRAM Dulux 23 W neutrální bílá	4 000	23,0	1 600	69,6	80	8 000	109
	OSRAM Dulux 23 W studená bílá	6 500	23,0	1 420	61,7	80	6 000	109

Tab. 4-3 Parametry LED retrofitů s různými režimy provozu udané výrobcem [61] [62] [63]

Světelný zdroj/režim		T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	R_a (-)	t_z (h)	$N_{xpoř}$ (Kč)
LED Vitae	Noc – 2 W	-	2	-	-	-	20 000	1 990
	Večer – 6 W	2 700	6	-	-	97,5		
	Den – 7 W	4 000	7	-	-	96,5		
EMOS LED SMD2835	10% Φ	2 700	1	80,6	80,6	80,0	30 000	79
	50% Φ	2 700	5	403,0	80,6	80,0		
	100% Φ	2 700	10	806,0	80,6	80,0		
LED TRÁDFRI		-	11	1 000,0	90,9	90,0	25 000	599

Z tabulek je patrné, že některé parametry výrobci neuvádí. Například u klasických žárovek se předpokládá index podání barev blízký hodnotě 100 a teplota chromatičnosti okolo 2 700 K, protože tyto parametry jsou pro všechny žárovky jednotné. Měrný výkon M_z v tabulkách byl vypočten dle vztahu (1.1).

Před počátkem samotného měření došlo k zahoření světelných zdrojů. Klasické žárovky se zahořují 10 hodin (1 % střední doby života), zářivky a LED zdroje potom 100 hodin. Výsledkem je ustálení provozních parametrů za účelem validity měření. U každého ze zdrojů následně proběhlo měření světelně-technických veličin v kulovém integrátoru.

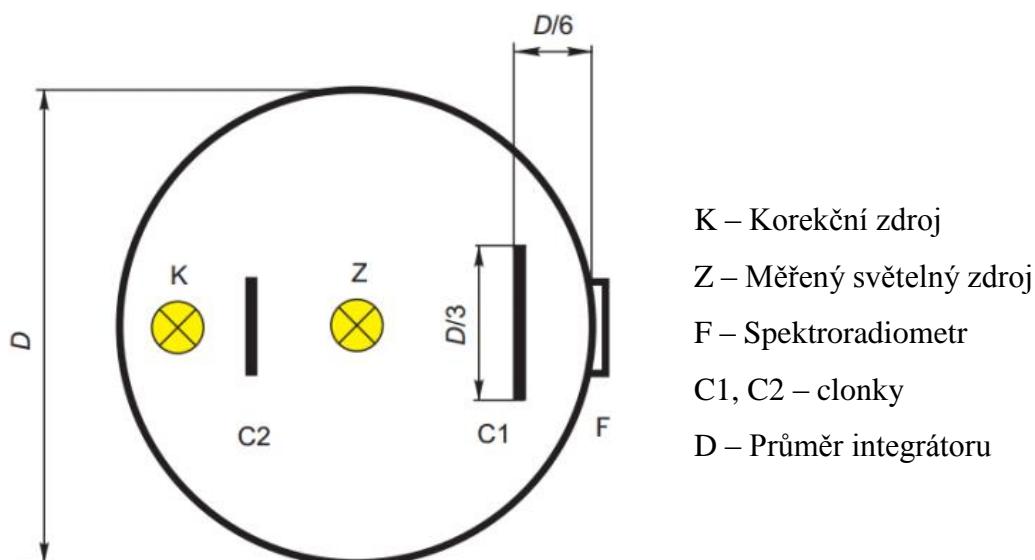
Kulový integrátor je uzavřený kulový prostor, do kterého zvnějšku neproniká žádné světlo a kde lze za pomoci měřicích přístrojů měřit vybrané světelně-technické veličiny světelných zdrojů. Vnitřní povrch KI tvoří tzv. ideální Lambertův zářič – plocha, která veškeré dopadající světlo rovnoměrně rozptyluje do všech směrů. Lambertův zářič má bílou barvu a garantuje rovnoměrné osvětlení prostoru uvnitř KI [64].

Na optickém výstupu KI je umístěn spektrometr (F – viz obr. 4-1), který snímá světlo dopadající na jeho měřicí plochu. Mezi spektrometrem a měřeným světelným zdrojem (Z) se nachází clonka (C1) proti přímému osvětlení, která zajišťuje, aby na optický výstup KI dopadalo pouze světlo rovnoměrně rozptýlené v celém integrátoru.

Světelné zdroje je nutno měřit uchycené v žárovkové objímce, která část odraženého světelného toku pohlcuje. Za účelem odstranění této chyby měření se provádí tzv. korekce na neaktivní část svítidla. Pomocí korekčního světelného zdroje (K) se osvětluje vnitřní prostor KI (přes clonku C2) nejprve bez svítidla a následně se svítidlem. Poměrem změřených světelných toků se pak určí korekční činitel podle vztahu (4.1), který je k odstranění chyby nezbytný. Měřicí software pak vezme korekci v potaz při následném měření. Korekční zdroj je napájen stejnosměrným laboratorním zdrojem [64] [65].

$$k_{kor} = \frac{\Phi_{KIprázdný}}{\Phi_{KIs svítidlem}} \quad (-) \quad (4.1)$$

Světelný zdroj (Z) je při měření napájen ze střídavého laboratorního zdroje (230 V), který zároveň slouží jako wattmetr. Stejnosměrný zdroj, střídavý zdroj i spektrometr jsou propojeny s PC a měřicím softwarem. Naměřená data ze spektrometru se vyhodnocují v programu Jeti LiVal [64].



Obr. 4-1 Schéma uspořádání kulového integrátoru [6]

Použité měřicí přístroje:

- Stejnoseměrný laboratorní zdroj EA PSI 5210 A
- Laboratorní zdroj APT 310 XAC
- Spektroradiometr JETI Specboss 1211 UV (v. č. 2015926)

Po vložení světelného zdroje do integrátoru a spuštění měření dochází k nárůstu provozní teploty daného zdroje. Měřené parametry se tímto způsobem zpočátku značně mění. K ustálení teploty dochází v řádech jednotek až desítek minut. Výsledné parametry zobrazují tab. 4-4, tab. 4-5 a tab. 4-6.

Tab. 4-4 Ustálené změřené a vypočtené hodnoty zdrojů

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	T_c, T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	R_a (-)
Klasická žárovka	TECHLAMP 40 W	2 661	41,6	386,8	9,3	99,11
	TECHLAMP 60 W	2 752	61,6	703,0	11,4	99,17
	TECHLAMP 75 W	2 733	73,4	758,1	10,3	99,12
Halogenová žárovka	EMOS lighting 42 W	2 799	44,9	572,1	12,7	99,03
	EMOS lighting 53 W	2 826	56,7	761,3	13,4	98,98
	EMOS lighting 70 W	2 908	73,5	1 147,0	15,6	98,85
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá	2 768	11,7	756,6	64,7	82,13
	OSRAM Dulux 12 W studená bílá	6 302	11,7	705,2	60,3	83,42
	OSRAM Dulux 15 W teplá bílá	2 777	15,0	984,9	65,7	82,27
	OSRAM Dulux 15 W studená bílá	6 261	14,3	836,4	58,5	81,31
	OSRAM Dulux 23 W teplá bílá	2 849	24,5	1 712,0	69,9	80,73
	OSRAM Dulux 23 W neutrální bílá	4 084	23,0	1 595,0	69,3	82,51
	OSRAM Dulux 23 W studená bílá	6 333	22,0	1 411,0	64,1	80,75

Tab. 4-5 Ustálené změřené a vypočtené hodnoty LED retrofitů

Světelný zdroj	T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	R_a (-)
LED Flair 6 W	2 709	5,9	827,7	140,3	81,15
EMOS LED 8 W teplá bílá	2 761	8,0	1 059,0	132,4	82,11
EMOS LED 8 W studená bílá	6 841	8,2	1 164,0	142,0	84,36
OSRAM LED 8,5 W teplá bílá	2 792	8,7	798,4	91,8	81,86
OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá	4 053	8,6	888,0	103,3	82,87
OSRAM LED 8,5 W studená bílá	6 767	8,2	858,9	104,7	83,79
CENTURY LED 10 W teplá bílá	2 754	11,8	1 431,0	121,3	80,72
CENTURY LED 10 W neutrální bílá	3 920	11,2	1 601,0	139,2	89,46
LED Megaman 11 W teplá bílá	2 812	10,5	1 024,0	97,5	81,83
LED Megaman 11 W neutrální bílá	3 986	10,3	1 182,0	114,8	80,51
LED Megaman 11 W studená bílá	6 275	10,5	1 206,0	114,9	81,75
LED Livarnolux 19 W	2 778	18,9	1 482,0	78,4	98,06

Tab. 4-6 Ustálené změřené a vypočtené hodnoty LED retrofitů s různými režimy provozu

Světelný zdroj	Specifikum		T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	R_a (-)
LED Vitae 3 režimová	Noc – 2 W		1 557	2,1	27,7	13,19	24,05
	Večer – 6 W		2 636	5,7	253,2	44,42	97,60
	Den – 7 W		3 883	7,1	366,2	51,58	98,55
EMOS LED SMD2835	10% Φ		2 688	1,0	122,0	122,0	83,11
	50% Φ		2 728	5,1	541,6	106,2	81,74
	100% Φ		2 688	10,4	845,9	81,3	80,52
LED TRÁDFRI stmívatelná s různými barevnými režimy	2 200 K	Minimální Φ	2 227	0,8	54,8	68,5	85,97
		Střední Φ	2 236	3,0	275,0	91,7	85,54
		Maximální Φ	2 267	11,3	965,3	85,4	83,98
	2 700 K	Minimální Φ	2 699	0,8	56,1	70,1	91,74
		Střední Φ	2 719	3,0	280,6	93,5	91,51
		Maximální Φ	2 738	11,4	998,3	87,6	90,50
	4 000 K	Minimální Φ	3 847	0,8	58,4	73,0	92,12
		Střední Φ	3 865	3,0	290,7	96,9	92,20
		Maximální Φ	3 870	11,3	1 019,0	90,2	92,97

Při měření přepínatelných a stmívatelných LED retrofitů se u LED Vitae a EMOS LED SMD2835 změřily všechny dostupné režimy, ovšem LED TRÁDFRI nabízela 3 barevné režimy po celkem 7 stupních světelného toku, dohromady tedy 21 nastavitelných stavů. Pro tuto práci byly vybrány první, čtvrtý a sedmý (nejvyšší) stupeň světelného toku, které se proměřily ve všech třech barevných režimech.

Při porovnání měřených a výrobcem udaných hodnot lze pozorovat jisté rozdíly mezi jednotlivými veličinami. Náhradní teplota chromatičnosti se většinou liší nepatrně v řádech desítek kelvinů. Nejvyšší odchylku zaznamenává retrofit OSRAM LED 8,5 W studená bílá, kde se měřená (6 767 K) a udávaná (6 500 K) hodnota liší o 267 K.

Rozdíly v indexu podání barev jsou opět velmi malé, maximálně několik jednotek. U přepínatelné a stmívatelné LED TRÁDFRI uvedl výrobce jednotný $R_a = 90$, což vzhledem k různým náhradním teplotám chromatičnosti není jednoduché zařadit, a proto se výsledný R_a pohybuje v rozmezí 85,97 – 92,97.

Poměrně značné rozdíly se ovšem objevují při porovnávání světelného toku, elektrického příkonu a z nich vypočteného měrného výkonu. Největší rozdíly mezi udanými a změřenými parametry vybraných zdrojů názorně zachycuje tab. 4-7, kde se parametry dělí do dvou řádků: „Výrobce“ pro teoretické parametry udané výrobcem a „Měření“ pro parametry přímo změřené v laboratoři.

Tab. 4-7 Rozdíly v parametrech světelných zdrojů

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	Parametry	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	δM_z (%)
Halogenová žárovka	EMOS lighting 70 W	Výrobce	70,0	1300,0	18,6	-16,1
		Měření	73,5	1147,0	15,6	
LED retrofit	CENTURY LED 10 W teplá bílá	Výrobce	10,0	1521,0	152,1	-20,2
		Měření	11,8	1431,0	121,3	
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá	Výrobce	12,0	650,0	54,2	+19,4
		Měření	11,7	756,6	64,7	
LED retrofit	LED Megaman 11 W studená bílá	Výrobce	11	1 055	95,9	+19,8
		Měření	10,5	1206	114,9	

Halogenová žárovka EMOS lighting 70 W a LED retrofit CENTURY 10 W teplá bílá vykazují horší reálné parametry, než jaké by podle výrobce měly mít. Reálný elektrický příkon je vyšší a světelný tok zase nižší, tedy zhoršení v obou hlavních sledovaných parametrech, které vede k tomu, že výsledný měrný výkon je o 16,1 % a 20,2 % nižší než očekávaný.

Naopak další dva zdroje vycházejí v praxi lépe v obou hlavních sledovaných parametrech, což u kompaktní zářivky OSRAM Dulux 12 W teplá bílá vede k navýšení měrného výkonu o 19,4 % a u LED retrofitu Megaman 11 W studená bílá o 19,8 %. Částečnou příčinou tohoto zlepšení může být fakt, že měřené zdroje jsou nové a došlo u nich pouze k zahoření po dobu 100 hodin. Někteří výrobci totiž udávají provozní parametry až po 1 000 hodinách provozu.

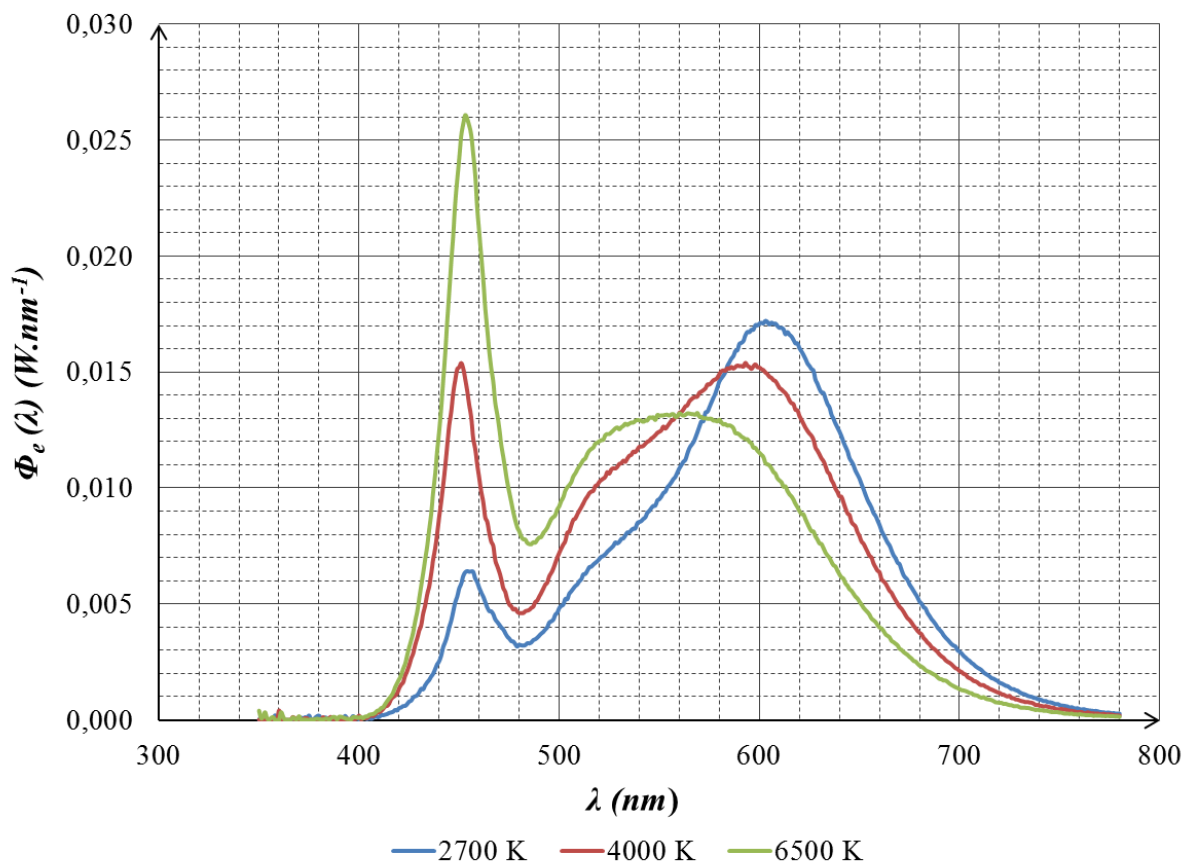
Dalším důležitým tématem jsou rozdíly mezi LED retrofity stejného elektrického příkonu s odlišnou náhradní teplotou chromatičnosti. Tab. 4-8 ukazuje jednu z měřených sad LED zdrojů, u níž by každý ze zdrojů měl mít podle výrobce totožné parametry.

Tab. 4-8 Porovnání parametrů sady LED retrofitů OSRAM

Členění	Světelný zdroj	T_{cp} (K)	P (W)	Φ (lm)	M_z (lm.W ⁻¹)	δM_z (%)
Teoretické	OSRAM LED 8,5 W	-	8,5	806,0	94,8	-
Změřené	OSRAM LED 8,5 W teplá bílá	2 700	8,7	798,4	91,8	-3,1
	OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá	4 000	8,6	888,0	103,3	+9,0
	OSRAM LED 8,5 W studená bílá	6 500	8,2	858,9	104,7	+10,4

Z tab. 4-8 vyplývá, že s vyšší náhradní teplotou chromatičnosti LED zdrojů roste i jejich měrný výkon. Tento fakt je daný principem generování bílé barvy LED zdrojů.

Svítlivé diody (LED) v základu emitují světlo odpovídající vlnové délce modré či UV oblasti, které se následně přes luminofor mění na ostatní viditelné barvy. Průchodem světla přes luminofor dochází ovšem ke ztrátám, které se projevují sníženým světelným tokem při stejném elektrickém příkonu. Za účelem dosažení nízkých náhradních teplot chromatičnosti (např. 2 700 K) musí světlo projít největší transformací přes luminofor a ztráty dosahují nejvyšších hodnot (viz obr. 4-2).



Obr. 4-2 Spektrální průběhy měřených LED retrofitů OSRAM 8,5 W

V konečném důsledku mají tedy LED s nižšími náhradními teplotami chromatičnosti horší parametry, což je patrné z tab. 4-8, kde LED zdroj 2 700 K vykazuje nejvyšší elektrický příkon a nejnižší vyzařovaný světelný tok. Naopak pro LED retrofit 6 500 K vyšel nejvyšší měrný výkon a měl by potenciálně být i nejlevnějším zdrojem, co se týče celkových nákladů.

LED retrofity s vysokými náhradními teplotami chromatičnosti se ovšem nehodí pro osvětlování ve večerních a nočních hodinách, kdy kvůli vysokému obsahu modré složky světla narušují lidský cirkadiánní cyklus, což je jejich podstatná nevýhoda.

4.2 Ekonomické zhodnocení

Při vyhodnocení ekonomické výhodnosti zdrojů dochází k porovnání světelných zdrojů podle celkových nákladů mezi sebou a k porovnání výpočtů zahrnujících teoretické hodnoty udané výrobcem a výpočtů z reálně změřených hodnot v laboratoři.

Ekonomické výpočty lze provést pomocí dvou dříve zmiňovaných metod – univerzální metodou a metodou po krocích. V této práci se využilo obou postupů s tím, že univerzální metoda nabízí přehlednější orientaci ve finálních nákladech a pomocí metody po krocích se následně lze dopracovat k podrobnějšímu rozboru veličin ovlivňujících celkové náklady. Zároveň dochází k ověření shody výsledků mezi oběma metodami.

4.2.1 Univerzální metoda

Tab. 4-9 zobrazuje vypočtené náklady na produkci jednotkového světelného množství N_ϕ a celkové náklady N za svícení po dobu t_R (10 000 h) světelným tokem Φ_R (1 000 lm) pro dané světelné zdroje. Výpočty byly provedeny na základě parametrů udaných výrobcí těchto zdrojů.

Náklady na produkci jednotkového světelného množství N_ϕ a celkové náklady N vycházející z hodnot změřených v laboratoři reprezentují tab. 4-10 a tab. 4-11.

Tab. 4-9 Ekonomické ukazatele pro teoretické parametry světelných zdrojů

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj		N_{Φ} [Kč.(Mlm.h) ⁻¹]	N (Kč)
Klasická žárovka	TECHLAMP 40 W		546,00	5 460
	TECHLAMP 60 W		470,39	4 704
	TECHLAMP 75 W		438,80	4 388
Halogenová žárovka	EMOS lighting 42 W		415,09	4 151
	EMOS lighting 53 W		380,54	3 805
	EMOS lighting 70 W		315,01	3 150
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá		133,99	1 340
	OSRAM Dulux 12 W studená bílá		133,99	1 340
	OSRAM Dulux 15 W teplá bílá		134,86	1 349
	OSRAM Dulux 15 W studená bílá		141,61	1 416
	OSRAM Dulux 23 W teplá bílá		110,93	1 109
	OSRAM Dulux 23 W neutrální bílá		102,55	1 025
	OSRAM Dulux 23 W studená bílá		118,74	1 187
LED retrofit	LED Flair 6 W		55,78	558
	EMOS LED 8 W teplá bílá		53,86	539
	EMOS LED 8 W studená bílá		52,73	527
	OSRAM LED 8,5 W teplá bílá		77,54	775
	OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá		77,54	775
	OSRAM LED 8,5 W studená bílá		77,54	775
	CENTURY LED 10 W teplá bílá		47,71	477
	CENTURY LED 10 W neutrální bílá		47,71	477
	LED Megaman 11 W teplá bílá		73,64	736
	LED Megaman 11 W neutrální bílá		73,64	736
	LED Megaman 11 W studená bílá		73,64	736
	LED Livarnolux 19 W		65,39	654
LED retrofity s různými režimy provozu	LED Vitae 3 režimová		-	-
	EMOS LED SMD2835 stmívatelná	10% Φ	93,36	934
		50% Φ	83,60	836
		100% Φ	82,38	824
	LED TRÅDFRI		-	-

Výpočty nákladů N_Φ a N jsou provedeny podle vztahů (3.14) a (3.15) a pro první řádek tab. 4-9 platí:

$$N_\Phi = \frac{N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} + A \cdot (P + \Delta P) \cdot t_z \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{R_a}}{\frac{\Phi \cdot t_z}{10^6}}$$

$$N_\Phi = \frac{20 \text{ Kč} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{1} + 5,233 \left[\text{Kč} \cdot (\text{kWh})^{-1} \right] \cdot (40 \text{ W} + 0 \text{ W}) \cdot 1000 \text{ h} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{100}}{\frac{420 \text{ lm} \cdot 1000 \text{ h}}{10^6}}$$

$$N_\Phi = 546 \text{ Kč} \cdot (\text{Mlm} \cdot \text{h})^{-1}$$

$$N = N_\Phi \cdot \Phi_R \cdot t_R$$

$$N = 546 \text{ Kč} \cdot (\text{Mlm} \cdot \text{h})^{-1} \cdot 0,001 \text{ Mlm} \cdot 10000 \text{ h}$$

$$N = 5460 \text{ Kč}$$

Tab. 4-9 přehledně seřazuje skupiny světelných zdrojů podle jejich ekonomické výhodnosti. Vyjasňuje se tak fakt, že LED retrofity jsou nejpopulárnější skupinou světelných zdrojů v dnešní době, jelikož jejich náklady jsou oproti ostatním skupinám zdrojů výrazně nižší. Pro některé zdroje není možno teoretické náklady vypočítat, protože výrobce neudal dostatečné množství parametrů.

Tab. 4-10 Ekonomické ukazatele pro změřené parametry světelných zdrojů

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	N_{ϕ} [Kč.(Mlm.h) ⁻¹]	N (Kč)
Klasická žárovka	TECHLAMP 40 W	619,56	6 196
	TECHLAMP 60 W	490,83	4 908
	TECHLAMP 75 W	537,54	5 375
Halogenová žárovka	EMOS lighting 42 W	483,77	4 838
	EMOS lighting 53 W	445,64	4 456
	EMOS lighting 70 W	373,67	3 737
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá	109,90	1 099
	OSRAM Dulux 12 W studená bílá	116,27	1 163
	OSRAM Dulux 15 W teplá bílá	112,27	1 123
	OSRAM Dulux 15 W studená bílá	128,17	1 282
	OSRAM Dulux 23 W teplá bílá	103,38	1 034
	OSRAM Dulux 23 W neutrální bílá	100,00	1 000
	OSRAM Dulux 23 W studená bílá	113,92	1 139
LED retrofit	LED Flair 6 W	53,13	531
	EMOS LED 8 W teplá bílá	52,64	526
	EMOS LED 8 W studená bílá	46,76	468
	OSRAM LED 8,5 W teplá bílá	78,30	783
	OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá	68,93	689
	OSRAM LED 8,5 W studená bílá	67,66	677
	CENTURY LED 10 W teplá bílá	58,46	585
	CENTURY LED 10 W neutrální bílá	46,49	465
	LED Megaman 11 W teplá bílá	71,17	712
	LED Megaman 11 W neutrální bílá	61,49	615
	LED Megaman 11 W studená bílá	60,49	605
	LED Livarnolux 19 W	70,19	702

Tab. 4-11 Ekonomické ukazatele pro změřené parametry LED retrofitů s různými režimy provozu

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	Specifikum		N_{Φ} [Kč.(Mlm.h) ⁻¹]	N (Kč)
LED retrofity s různými režimy provozu	LED Vitae 3 režimová	Noc – 2 W		1 594,08	15 941
		Večer – 6 W		251,69	2 517
		Den – 7 W		193,52	1 935
	EMOS LED SMD2835	10% Φ		62,40	624
		50% Φ		62,72	627
		100% Φ		81,46	815
	LED TRÁDFRI stmívatelná s různými barevnými režimy	2 200 K	Minimální Φ	161,73	1 617
			Střední Φ	81,26	813
			Maximální Φ	77,08	771
		2 700 K	Minimální Φ	152,53	1 525
			Střední Φ	75,37	754
			Maximální Φ	70,03	700
		4 000 K	Minimální Φ	146,20	1 462
			Střední Φ	72,31	723
			Maximální Φ	66,34	663

Z předcházejících tabulek vyplývá, že nejnákladnějším světelným zdrojem je s velkým náskokem noční režim LED retrofitu Vitae, především kvůli jeho nízkému měrnému výkonu ($13,19 \text{ lm.W}^{-1}$) a vysoké pořizovací ceně (1 990 Kč za celý retrofit). Ve výpočtu nákladů se navíc neuvažoval jeho nízký index podání barev ($R_a = 24,05$) a přepočítadlo se, že koeficient $k_l = 1$.

Zmíněný předpoklad vychází z faktu, že noční režim není určený pro dlouhodobé osvětlování větších prostor s nárokem na kvalitu podání barev, nýbrž pro velmi tlumené osvětlení za účelem např. bezpečnosti při noční cestě na toaletu. Zde je prioritní úplně odstranit nebo co nejvíce snížit obsah modré složky ve spektru, která narušuje cirkadiánní cyklus. Nízký index podání barev je tak více výhodou nežli nedostatkem tohoto retrofitu.

Naopak nejvýhodnějším světelným zdrojem se jeví LED retrofit CENTURY 10 W neutrální bílá, který dosahuje mezi měřenými zdroji jednoho z nejvyšších měrných výkonů ($139,2 \text{ lm.W}^{-1}$) a jeho index podání barev vyšel značně vyšší než očekávaný ($R_a = 89,46$ oproti teoretickému $R_{at} = 80$). Právě tento typ retrofitů – filament LED zdroje imitující klasické vláknové žárovky – dosahuje mezi kompaktními LED zdroji nejvyšších měrných výkonů a ve výsledku tedy nejlepšího ekonomického zhodnocení, co se týče celkových nákladů.

Pokud by mělo dojít k porovnání nákladů podle parametrů výrobce a nákladů podle změřených parametrů mezi sebou (tab. 4-9, tab. 4-10 a tab. 4-11), pak u LED zdrojů se náklady liší v řádech jednotek korun za megalumenhodinu a u ostatních zdrojů jsou to desítky korun za megalumenhodinu. Nejvýraznější odchylky zachycuje tab. 4-12.

Tab. 4-12 Nejvýraznější rozdíly v nákladech při uvažování parametrů od výrobce a parametrů změřených

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj		Parametry	N_{ϕ} [Kč.(Mlm.h) ⁻¹]	N (Kč)	δN (%)
LED retrofit s různými režimy provozu	EMOS LED SMD2835 stmívatelná	10% ϕ	Výrobce	93,36	934	-33,2
			Měření	62,40	624	
		50% ϕ	Výrobce	83,60	836	-25,0
			Měření	62,72	627	
LED retrofit	CENTURY LED 10 W teplá bílá		Výrobce	47,71	477	+22,5
			Měření	58,46	585	
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá		Výrobce	133,99	1 340	-18,0
			Měření	109,90	1 099	

V tab. 4-12 lze pozorovat značný rozdíl nákladů zejména u LED retrofitu EMOS SMD2835, kde výrobce velmi nepřesně odhadl parametry zdroje při sníženém světelném toku (viz tab. 4-3 a tab. 4-6). LED retrofit CENTURY 10 W teplá bílá pak vykazuje největší kladnou odchylku a kompaktní zářivka OSRAM Dulux 12 W teplá bílá největší zápornou odchylku skutečných nákladů oproti teoretickým u světelných zdrojů s neregulovatelným světelným tokem.

4.2.2 Metoda po krocích

V následujících tabulkách jsou detailněji zobrazeny vypočtené ekonomické ukazatele pro výrobcem udané parametry světelných zdrojů pro referenční dobu svícení t_R (10 000 h) a referenční světelný tok Φ_R (1 000 lm).

Tab. 4-13 Podrobnější ekonomické ukazatele pro parametry světelných zdrojů udané výrobcem

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{nákup}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
Klasická žárovka	TECHLAMP 40 W	2,38	95,2	10,00	23,81	476,2	4 983,8	5 460
	TECHLAMP 60 W	1,41	84,5	10,00	14,08	281,7	4 422,3	4 704
	TECHLAMP 75 W	1,06	79,8	10,00	10,64	212,8	4 175,3	4 388
Halogenová žárovka	EMOS lighting 42 W	1,59	66,7	5,00	7,94	627,0	3 523,9	4 151
	EMOS lighting 53 W	1,19	63,1	5,00	5,95	470,2	3 335,1	3 805
	EMOS lighting 70 W	0,77	53,8	5,00	3,85	303,8	2 846,2	3 150
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá	1,54	18,5	1,00	1,54	132,3	1 207,6	1 340
	OSRAM Dulux 12 W studená bílá	1,54	18,5	1,00	1,54	132,3	1 207,6	1 340
	OSRAM Dulux 15 W teplá bílá	1,19	17,9	1,67	1,98	180,6	1 168,1	1 349
	OSRAM Dulux 15 W studená bílá	1,25	18,8	1,67	2,08	189,6	1 226,5	1 416
	OSRAM Dulux 23 W teplá bílá	0,66	15,1	1,67	1,10	119,5	989,8	1 109
	OSRAM Dulux 23 W neutrální bílá	0,63	14,4	1,25	0,78	85,2	940,3	1 026
	OSRAM Dulux 23 W studená bílá	0,70	16,2	1,67	1,17	127,9	1 059,5	1 187

Tab. 4-14 Podrobnější ekonomické ukazatele pro parametry LED retrofitů udané výrobcem

Světelný zdroj	Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{nákup}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
LED Flair 6 W	1,23	7,4	0,67	0,82	73,3	484,5	558
EMOS LED 8 W teplá bílá	0,94	7,5	0,40	0,38	44,9	493,7	539
EMOS LED 8 W studená bílá	0,94	7,5	0,40	0,38	33,6	493,7	527
OSRAM LED 8,5 W teplá bílá	1,24	10,5	1,00	1,24	85,6	689,8	775
OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá	1,24	10,5	1,00	1,24	85,6	689,8	775
OSRAM LED 8,5 W studená bílá	1,24	10,5	1,00	1,24	85,6	689,8	775
CENTURY LED 10 W teplá bílá	0,66	6,6	0,40	0,26	47,1	430,1	477
CENTURY LED 10 W neutrální bílá	0,66	6,6	0,40	0,26	47,1	430,1	477
LED Megaman 11 W teplá bílá	0,95	10,4	0,67	0,63	54,3	682,0	736
LED Megaman 11 W neutrální bílá	0,95	10,4	0,67	0,63	54,3	682,0	736
LED Megaman 11 W studená bílá	0,95	10,4	0,67	0,63	54,3	682,0	736
LED Livarnolux 19 W	0,63	11,9	0,40	0,25	19,8	634,1	654

Tab. 4-15 Podrobnější ekonomické ukazatele pro parametry LED s různými režimy provozu udané výrobcem

Světelný zdroj		Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{nákup}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
LED Vitae 3 režimová		-	-	-	-	-	-	-
EMOS LED SMD2835 stmívatelná	10% Φ	12,41	12,4	0,33	4,14	122,0	811,6	934
	50% Φ	2,48	12,4	0,33	0,83	24,4	811,6	836
	100% Φ	1,24	12,4	0,33	0,41	12,2	811,6	824
LED TRÁDFRI		-	-	-	-	-	-	-

Σ = počet kusů v sadě na referenční tok Φ_R

P_c = celkový příkon sady

n = počet sad potřebný k pokrytí doby svícení t_R

Σ_c = celkový počet kusů

$N_{nákup}$ = modifikované pořizovací náklady za Σ_c zdrojů

N_{provoz} = modifikované náklady na provoz Σ_c zdrojů za dobu svícení t_R

N = celkové náklady za svícení po dobu t_R světelným tokem Φ_R

Výpočty hodnot v tabulce byly provedeny dle vztahů (3.16) – (3.26). Níže jsou uvedeny příklady jednotlivých výpočtů pro EMOS LED SMD2835 se 100% světelným tokem z tab. 4-15:

$$\Sigma = \frac{\Phi_R}{\Phi} = \frac{1000lm}{806lm} = 1,24 kusů$$

$$P_c = P \cdot \Sigma = 10W \cdot 1,24 = 12,4W$$

$$n = \frac{t_R}{t_z} = \frac{10000h}{30000h} = 0,33 sad$$

$$\Sigma_c = n \cdot \Sigma = 0,33 \cdot 1,24 = 0,41 kusů$$

$$N_{poř} = N_{xpoř} \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{y} = 59 Kč \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{2} = 29,5 Kč$$

$$N_{nákup} = \Sigma_c \cdot N_{poř} = 0,41 \cdot 29,5 Kč = 12,2 Kč$$

$$N_{provoz} = P_c \cdot 10^{-3} \cdot t_R \cdot A \cdot \frac{100}{R_a}$$

$$N_{provoz} = 12,4W \cdot 10^{-3} \cdot 10000h \cdot 5,233 \left[Kč \cdot (kWh)^{-1} \right] \cdot \frac{100}{80} = 811,6 Kč$$

$$N = N_{\text{nákup}} + N_{\text{provoz}} = 12,2 \text{ Kč} + 811,6 \text{ Kč} = 824 \text{ Kč}$$

Po dosazení změřených hodnot v laboratoři do výpočtů zobrazují podrobnější ekonomické ukazatele pro referenční veličiny t_R a Φ_R tab. 4-16, tab. 4-17 a tab. 4-18.

Tab. 4-16 Podrobnější ekonomické ukazatele pro změřené parametry světelných zdrojů

Typ světelného zdroje	Světelný zdroj	Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{\text{nákup}}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
Klasická žárovka	TECHLAMP 40 W	2,6	107,5	10,00	25,9	517,1	5 678,6	6 196
	TECHLAMP 60 W	1,4	87,6	10,00	14,2	284,5	4 623,8	4 908
	TECHLAMP 75 W	1,3	96,8	10,00	13,2	263,8	5 111,6	5 375
Halogenová žárovka	EMOS lighting 42 W	1,7	78,5	5,00	8,7	690,4	4 147,2	4 838
	EMOS lighting 53 W	1,3	74,5	5,00	6,6	518,8	3 937,6	4 456
	EMOS lighting 70 W	0,9	64,1	5,00	4,4	344,4	3 392,3	3 737
Kompaktní zářivka	OSRAM Dulux 12 W teplá bílá	1,3	15,5	1,00	1,3	113,7	985,3	1 099
	OSRAM Dulux 12 W studená bílá	1,4	16,6	1,00	1,4	122,0	1 040,8	1 163
	OSRAM Dulux 15 W teplá bílá	1,0	15,2	1,67	1,7	154,0	968,7	1 123
	OSRAM Dulux 15 W studená bílá	1,2	17,1	1,67	2,0	181,3	1 100,3	1 282
	OSRAM Dulux 23 W teplá bílá	0,6	14,3	1,67	1,0	106,1	927,6	1 034
	OSRAM Dulux 23 W neutrální bílá	0,6	14,4	1,25	0,8	85,4	914,6	1 000
	OSRAM Dulux 23 W studená bílá	0,7	15,6	1,67	1,2	128,8	1 010,4	1 139

Tab. 4-17 Podrobnější ekonomické ukazatele pro změřené parametry LED retrofitů

Světelný zdroj	Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{nákup}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
LED Flair 6 W	1,2	7,1	0,67	0,8	71,7	459,7	531
EMOS LED 8 W teplá bílá	0,9	7,6	0,40	0,4	44,9	481,4	526
EMOS LED 8 W studená bílá	0,9	7,0	0,40	0,3	30,6	437,0	468
OSRAM LED 8,5 W teplá bílá	1,3	10,9	1,00	1,3	86,4	696,6	783
OSRAM LED 8,5 W neutrální bílá	1,1	9,7	1,00	1,1	77,7	611,6	689
OSRAM LED 8,5 W studená bílá	1,2	9,5	1,00	1,2	80,3	596,3	677
CENTURY LED 10 W teplá bílá	0,7	8,2	0,40	0,3	50,0	534,6	585
CENTURY LED 10 W neutrální bílá	0,6	7,2	0,40	0,2	44,7	420,2	465
LED Megaman 11 W teplá bílá	1,0	10,3	0,67	0,7	56,0	655,7	712
LED Megaman 11 W neutrální bílá	0,8	8,7	0,67	0,6	48,5	566,4	615
LED Megaman 11 W studená bílá	0,8	8,7	0,67	0,6	47,5	557,3	605
LED Livarnolux 19 W	0,7	12,8	0,40	0,3	21,3	680,6	702

Tab. 4-18 Podrobnější ekonomické ukazatele pro změřené parametry LED s různými režimy provozu

Světelný zdroj	Specifikum		Σ (-)	P_c (W)	n (-)	Σ_c (-)	$N_{nákup}$ (Kč)	N_{provoz} (Kč)	N (Kč)
LED Vitae 3 režimová	Noc – 2 W		36,1	75,8	0,50	18,1	11 973,5	3 967,3	15 941
	Večer – 6 W		3,9	22,5	0,50	2,0	1 309,9	1 207,0	2 517
	Den – 7 W		2,7	19,4	0,50	1,4	905,7	1 029,5	1 935
EMOS LED SMD2835	10% Φ		8,2	8,2	0,33	2,7	107,9	516,1	624
	50% Φ		1,8	9,4	0,33	0,6	24,3	602,8	627
	100% Φ		1,2	12,3	0,33	0,4	15,6	799,0	815
LED TRÁDFRI stmívatelná s různými barevnými režimy	2 200 K	Minimální Φ	18,2	14,6	0,40	7,3	728,7	888,6	1 617
		Střední Φ	3,6	10,9	0,40	1,5	145,2	667,4	813
		Maximální Φ	1,0	11,7	0,40	0,4	41,4	729,4	771
	2 700 K	Minimální Φ	17,8	14,3	0,40	7,1	711,8	813,4	1 525
		Střední Φ	3,6	10,7	0,40	1,4	142,3	611,4	754
		Maximální Φ	1,0	11,4	0,40	0,4	40,0	660,3	700
	4 000 K	Minimální Φ	17,1	13,7	0,40	6,8	683,8	778,2	1 462
		Střední Φ	3,4	10,3	0,40	1,4	137,4	585,7	723
		Maximální Φ	1,0	11,1	0,40	0,4	39,2	624,2	663

Σ = počet kusů v sadě na referenční tok Φ_R

P_c = celkový příkon sady

n = počet sad potřebný k pokrytí doby svícení t_R

Σ_c = celkový počet kusů

$N_{nákup}$ = modifikované pořizovací náklady za Σ_c zdrojů

N_{provoz} = modifikované náklady na provoz Σ_c zdrojů za dobu svícení t_R

N = celkové náklady za svícení po dobu t_R světelným tokem Φ_R

Po detailnějším pohledu na hodnoty v tab. 4-16, tab. 4-17 a tab. 4-18 se vyjasňuje, proč jsou např. klasické žárovky tolik nákladné a proč LED retrofity vycházejí, co se týče ceny, nejlépe. Vlivem krátké střední doby života t_z žárovek (1 000 hodin) dochází k tomu, že na pokrytí referenční doby svícení $t_R = 10\,000$ h jich potřebujeme značné množství oproti LED retrofitům, kde se t_z pohybuje od 10 000 do 50 000 h. Z tohoto důvodu modifikované pořizovací náklady $N_{nákup}$ klasických žárovek značně převyšují náklady LED zdrojů, přestože jedna klasická žárovka je daleko levnější než libovolný LED retrofit.

Největší roli při výpočtu modifikovaných nákladů na provoz N_{provoz} hraje měrný výkon světelného zdroje. Čím vyšší je měrný výkon zdroje, tím menší je pak parametr P_c (celkový příkon sady) a tím levnější na provoz daný zdroj je. U klasických žárovek dosahuje P_c hodnot blízkých 100 W, kdežto u LED retrofitů se pohybuje okolo 10 W. Modifikované náklady na provoz LED zdrojů pak často vychází až 10krát nižší.

Při zkoumání cen u stmívatelných LED retrofitů s přepínatelnými barevnými režimy (tab. 4-18) lze zpravidla pozorovat, že s rostoucím světelným tokem a rostoucí náhradní teplotou chromatičnosti dochází ke snižování celkových nákladů světelného zdroje. Hlavní roli zde hraje fakt, že při nízkém světelném toku je třeba zakoupit velký počet zdrojů na pokrytí referenčního světelného toku. V kombinaci s vysokou pořizovací cenou těchto retrofitů dochází ke značnému nárůstu modifikovaných pořizovacích nákladů $N_{nákup}$.

Stmívatelné LED retrofity s přepínatelnými režimy jsou ve všech režimech (až na výjimky) nákladnější než klasické LED retrofity zejména proto, že obsahují větší počet součástí ve svých obvodech a zakupuje se k nim i další příslušenství (dálkový ovladač), což podstatně zvyšuje jejich pořizovací cenu. Tuto nevýhodu ovšem kompenzuje pohodlí s nimi spojené – změna náhradní teploty chromatičnosti během různé denní doby, snižování a zvyšování světelného toku v reakci na vykonávanou činnost (čtení, sledování televize,...), atd.

ZÁVĚR

S využitím informací ohledně parametrů světelných zdrojů došlo k sestavení ekonomického porovnávacího systému, jenž informuje uživatele o celkové ceně vynaložené na pořízení a provoz světelného zdroje. Pokud by se do budoucna tato jednoduchá výpočetní struktura zavedla on-line nebo jako aplikace do mobilních telefonů, uživatelé by si přímo v obchodě mohli za krátký čas zjistit, jaký světelný zdroj je z dlouhodobého hlediska nejvýhodnější.

Novou myšlenkou a přínosem této práce je snaha promítnout index podání barev (R_a) a možnost regulace světelného toku a změnu barvy světla zdrojů do celkových nákladů. Pomocí zavedených koeficientů (k_1 , k_2 , k_3) dochází při výpočtech nákladů k rozdílné celkové ceně dvou zdrojů se stejnými parametry, ale lišící se např. indexem podání barev. Dochází tak k zapojení indexu podání barev a komfortu regulace světelného toku a barvy do ekonomického hodnocení světelných zdrojů a zdroje tak nejsou hodnoceny pouze kvantitativně na základě množství vytvořeného světelného toku, ale i na základě kvality jejich světla a způsobu ovládání.

Po provedení měření a ekonomického porovnání světelných zdrojů lze konstatovat, že cenově nejvýhodněji vycházejí LED zdroje, jejichž vyšší pořizovací cena je vykompenzována nejlepšími provozními parametry. Nahrazování ostatních zdrojů pomocí LED se tak jeví jako logický důsledek. Do budoucna lze s vývojem technologií navíc očekávat postupné snižování pořizovacích cen LED zdrojů tak, jako tomu bylo doposud, což ještě výrazněji sníží jejich celkové náklady. Jako nejméně výhodně vyšly podle očekávání klasické žárovky, kterých naopak v běžných domácnostech rapidně ubývá.

Mimo jiné se také ukázalo, že výrobci světelných zdrojů uvádějí na krabičkách a obalech od zdrojů parametry, které se často značně liší od skutečných. Nepočítají např. s tím, že odlišná náhradní teplota chromatičnosti LED zdrojů ovlivňuje účinnost přeměny elektrické energie na světlo, a tedy i měrný výkon. Výsledkem jsou pak vyšší celkové náklady na LED s nízkými náhradními teplotami chromatičnosti a nižší náklady na LED s vysokými náhradními teplotami chromatičnosti, přestože parametry daných retrofitů by se podle výrobce mezi sebou neměly lišit.

Z hlediska celkových nákladů (pořizovacích + provozních) vyšel z 28 vzorků světelných zdrojů nejlépe LED retrofit CENTURY 10 W neutrální bílá (4000 K) s jedním z nejvyšších měrných výkonů ($139,2 \text{ lm.W}^{-1}$) a značně vyšším indexem podání barev než se očekávalo ($R_a = 89,46$ oproti teoretickému $R_{at} = 80$). Náklady na produkci jednotkového světelného množství tohoto zdroje činí $46,49 \text{ Kč.(Mlm.h)}^{-1}$. Daný retrofit reprezentuje skupinu filament LED zdrojů imitujících klasické vláknové žárovky, která dosahuje mezi všemi měřenými skupinami světelných zdrojů nejvyšších měrných výkonů, a tedy i nejlepšího ekonomického zhodnocení.

Mezi LED retrofity vycházejí z ekonomického hlediska nejlépe LED s vysokými náhradními teplotami chromatičnosti. V úvahu se ovšem musí brát fakt, že vysoká náhradní teplota chromatičnosti působí při večerních a nočních hodinách negativně na lidský cirkadiánní cyklus kvůli zvýšenému obsahu modré složky světla ve spektru. Nápadem pro další výzkum je tedy promítnout i tento faktor do ekonomických nákladů.

Nejméně výhodným světelným zdrojem z pohledu celkových nákladů je noční režim LED retrofitu Vitae zejména kvůli jeho nízkému měrnému výkonu ($13,19 \text{ lm.W}^{-1}$) a vysoké pořizovací ceně (1 990 Kč). Náklady na produkci jednotkového světelného množství zde činí $1 594,08 \text{ Kč.(Mlm.h)}^{-1}$. Do výpočtů navíc nebyl zohledněn jeho nízký index podání

barev ($R_a = 24,05$), který by celkové náklady ještě výrazně zvýšil. Noční režim daného retrofitu se od všech ostatních zdrojů liší tím, že je zaměřený nikoliv na výkon, ale na zrakovou pohodu a snahu nenarušit cirkadiánní cyklus. Jeho účelem je zajistit velmi tlumené večerní a noční osvětlení (s náhradní teplotou chromatičnosti 1557 K) např. při cestě na toaletu. Ekonomické zhodnocení tohoto zdroje pak nemá vypovídající hodnotu a ztrácí význam.

Nejvyššími celkovými náklady mezi světelnými zdroji využívanými pro běžné osvětlovací účely disponuje dle očekávání klasická žárovka TECHLAMP 40 W s nejnižším měrným výkonem ze všech zdrojů ($9,3 \text{ lm.W}^{-1}$) navzdory nejnižší pořizovací ceně (20 Kč). Náklady na produkci jednotkového světelného množství v tomto případě činí $619,56 \text{ Kč.(Mlm.h)}^{-1}$.

Uvedená data potvrzují fakt, že pořizovací cena zdroje není v dlouhodobém měřítku klíčovým ekonomickým ukazatelem, protože ji většinou několikanásobně převýší náklady na provoz světelného zdroje. Směrodatnou veličinou je zde měrný výkon zdroje, který výrobce většinou neuvádí, ale dá se jednoduše zjistit. Právě ten určuje, jak vysoké budou náklady za provoz zdroje. Dalším vodítkem může být energetická třída světelného zdroje, která ovšem poskytuje méně detailů než měrný výkon.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LED žárovka E27 11W 2 700K In: *Az-led* [online]. Praha: Assetto s. r. o., 2019 [cit. 2019-10-19]. Dostupné z: <https://www.az-led.cz/p/led-zarovka-11-75w-2700k-180-e27>
- [2] *Svět svítidel* [online]. Blansko: Donoci s. r. o., 2019 [cit. 2019-10-22]. Dostupné z: <https://www.svet-svitidel.cz>
- [3] *Lightpark* [online]. Praha: LIGHT PARK LTD, 2019 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://www.lightpark.cz/>
- [4] *Prodej kompletního sortimentu elektrotechnického materiálu - VOGEL electric, s. r. o.* [online]. Most: VOGEL electric s. r. o., 2019 [cit. 2019-10-28]. Dostupné z: <https://www.elektrotechnika-shop.cz/>
- [5] SOKANSKÝ, Karel a kol. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [6] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [7] *Světžárovek.eu - LED žárovky, LED pásky, úsporné žárovky* [online]. Litoměřice: SVĚT ŽÁROVEK s. r. o., 2019 [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.svetzarovek.eu>
- [8] HASHIM, Ahmad Affendi a Mazlina Abdul MAJID. *A Study on Colour Combination Guidelines for Text and Background in Web Legibility Perspective* [online]. Gambang: Universiti Malaysia Pahang, 2013 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.13140/2.1.4073.8087 Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273313729_A_Study_on_Colour_Combination_Guidelines_for_Text_and_Background_in_Web_Legibility_Perspective
- [9] Porovnání různých indexů podání barev. In: *Nooraneh Lighting Solutions* [online]. Tehran: Nooraneh Lighting Industry, 2019 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://en.nooraneh.com/articles-technical-information/cri-comparison/>
- [10] Spektrální průběhy světelných zdrojů. In: Physics Stack Exchange [online]. New York: Stack Overflow, 6. 8. 2017 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/350528/how-could-i-measure-the-colour-spectrum-of-a-light-bulb-and-investigate-how-clos>
- [11] A New Color Fidelity Index for LED and Light Measurement- TM-30-15. In: *Stellarnet* [online]. Tampa: StellarNet, Inc., 20. 6. 2018 [cit. 2019-11-04]. Dostupné z: <https://www.stellarnet.us/a-new-color-fidelity-index-for-led-and-light-measurement-tm-30-15>
- [12] ROYER, Michael. *IES TM-30-15: A New Tool for Evaluating Light Source Color Rendition* [online]. Tampa: Stellarnet, Inc., 25. 8. 2016. [cit. 2019-11-04]. Dostupné z: https://www.aatcc.org/wp-content/uploads/2016/08/Presentation_Royer.pdf

- [13] DILAURA L. DAVID, Kevin W. HOUSER, Richard G. MISTRICK a Gary R. STEFFY. *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10th edition. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011. ISBN 978-087995-241-9.
- [14] Škála teplot chromatičnosti. In: *TechniLED: LED osvětlení pro domácnost i průmysl* [online]. Brno: Omko Digital a. s., 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <http://www.techniled.cz/20-barevna-teplota>
- [15] STAŠA, Michal. Světloblog – Parametry světelných zdrojů. In: *Světloblog* [online]. Praha, 2019, říjen 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <http://www.svetloblog.cz/index.php?svetlo=parametry-svetelnych-zdroju>
- [16] Energetické třídy spotřebičů: Co znamenají a k čemu jsou vůbec dobré? In: *Blog Mall* [online]. Praha: Mall a. s., 15. 8. 2015 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <https://blog.mall.cz/bydleni/energeticke-tridy-spotrebicu-co-znamenaji-a-k-cemu-jsou-vubec-dobre-864.html>
- [17] Současné energetické třídy. *Bevedo.cz - vyhledávač pro váš domov* [online]. Praha: Bevedo, 2017 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <https://www.bevedo.cz/napoveda/clanky/energeticka-trida/>
- [18] ODBOR 41300. Ukončení povinnosti štítkovat svítidla a změna ve štítkování světelných zdrojů. *Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR* [online]. Praha, 20.12.2019 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: <https://mpo.cz/cz/energetika/energeticka-ucinnost/ekodesign-a-energeticke-stitkovani-vyrobkou/ukoncen-povinnosti-stitkovat-svitidla-a-zmena-ve-stitkovani-svetelnych-zdroju--251655/>
- [19] NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) č. 874/2012 ze dne 12. července 2012, kterým se doplňuje směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/30/EU, pokud jde o uvádění spotřeby energie na energetických štítcích elektrických světelných zdrojů a svítidel. Brusel: Úřední věstník Evropské unie, 2012.
- [20] NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) 2019/2015 ze dne 11. března 2019, kterým se doplňuje nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2017/1369, pokud jde o uvádění spotřeby energie na energetických štítcích světelných zdrojů, a zrušuje nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) č. 874/2012. Brusel: Úřední věstník Evropské unie, 2019.
- [21] BAČÁKOVÁ, Martina. *Světelné zdroje a jejich účinnost (Light sources and their efficiency)* [online]. České Budějovice, 2017 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: https://theses.cz/id/r035i8/Sv_tel_n_zdroje_a_jejich__innost.pdf. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Doc. PaedDr. Jiří Tesař, Ph.D.
- [22] Jak je to se zákazem světelných zdrojů v EU. In: *Metrolux* [online]. Praha: Metrolux s. r. o., 21. 3. 2018 [cit. 2019-10-26]. Dostupné z: <http://svetlovpraxi.cz/2018/03/21/jak-je-to-se-zakazem-svetelnych-zdroju-eu>

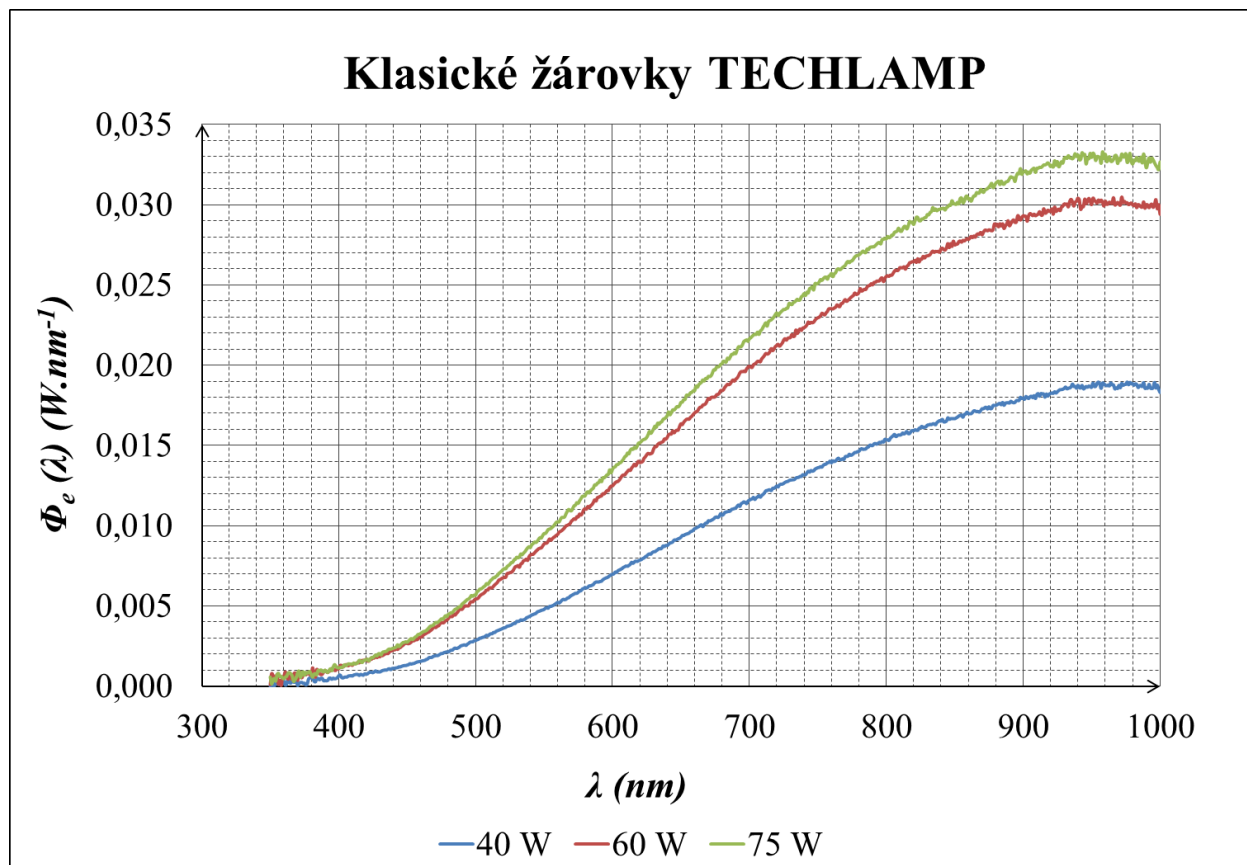
- [23] ILIC, Ognjen. Tailoring ultra-high temperature radiation: the resurrection of the incandescent source. In: *Nature Nanotechnology* 11 [online]. 4. Nature Publishing Group, 2016, 11. 1. 2016, s. 320–324 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/109242/Chen_Tailoring%20high-temperature.pdf;jsessionid=95955EFF8EDC90A497D001D62CB5F51C?sequence=1
- [24] Žárovka halogenová ELTA H7 12V / 55W patice PX26d. In: *Svět vozíků* [online]. Městec Králové: Svět vozíků, 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <https://www.svetvoziku.cz/zarovky/3125-zarovka-halogenova-elta-h7-12v-55w-patice-px26d-long-life-5021374016218.html>
- [25] Osram Halogenová žárovka E27 / 46 W (700 lm) teplá bílá. *Lightpark* [online]. Praha: OBI Česká republika s. r. o., 2019 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <https://www.obic.cz/halogenove-svetelne-zdroje-vysokonapetove/osram-halogenova-zarovka-e27-46-w-700-lm-tepla-bila/p/4678439>
- [26] Halogenový cyklus. In: *EARCH: Architektura online* [online]. Praha: ČVUT v Praze, 4. 2. 2010 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: <http://www.earch.cz/cs/svetelne-zdroje-halogenove-zarovky>
- [27] VÁCLAVÍK, Lukáš. V EU se už nebudou moci prodávat halogenové žárovky, zákaz bude platit od soboty. *Cnews* [online]. Praha: Mladá fronta, 28. 8. 2018 [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/eu-halogenove-zarovky-zakaz-zari-2018>
- [28] Konstrukce lineární zářivky. *Elektrika.cz* [online]. Brno: Elektrika.info s. r. o., 16. 7. 2009 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/svetelne-zdroje-linearni-zarivky>
- [29] Spirálová kompaktní zářivka. In: *Svět svítidel* [online]. Blansko: Donoci s. r. o., 2019 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.svet-svitidel.cz/kompaktni-zarivka-1xe27-18w-230v-narvatronic-nt-mini-840.html>
- [30] *LEDAKCE - LED pro domácnost a profesionály* [online]. Bratislava: LEDart, 2019 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://www.ledakce.cz>
- [31] LED trubice 160 lm/W. *NBB Bohemia s.r.o. – Světelné zdroje, svítidla, úsporná světelná řešení* [online]. Benešov nad Ploučnicí: NBB Bohemia s. r. o., 2019, 2019 [cit. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://eshop.nbb.cz/led-technologie/led-svetelne-zdroje/led-trubice/led-trubice-160-lm-w>
- [32] LED trubice 160 lm/W. *Inkoustcentrum.cz* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.inkoustcentrum.cz/led-trubice-160-lm-w/>
- [33] Nordlux LED žárovka E27 5W 2700K. In: *Severské Světlo - designová světla* [online]. Liberec: Severské světlo, 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://www.severske-svetlo.cz/nordlux-led-zarovka-e27-5w-2700k-45558>

- [34] LED zářivka 120CM 20W – čirý kryt, denní bílá. In: *LEDsviti.cz: LED osvětlení* [online]. Česká Lípa: LEDsviti.cz, 2019 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: https://www.ledsviti.cz/led-zarivka-120cm-20w-ciry-kryt-bila/?gclid=EAIaIQobChMI2s3sj5my5QIVBqaaCh346wdNEAYYASABEgJuhvD_BwE
- [35] DRÁPELA, Jiří. *Užití elektrické energie – Světelné zdroje a osvětlování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013.
- [36] TESLAMP žárovka 40W 230V E27, klasická čirá žárovka. *Lightpark* [online]. Praha: LIGHT PARK LTD, 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.lightpark.cz/teslamp-zarovka-cira-pro-prumyslove-pouziti-40w-240v-e27/>
- [37] Halogenová žárovka CLASSIC A55 E27/42W/230V. *Svět svítidel* [online]. Blansko: Donoci s. r. o., 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.svet-svitidel.cz/narva-300100042-halogenova-zarovka-classic-a55-e27-42w-230v/>
- [38] OSRAM 30W/840 G13 LUMILUX-T8 zářivka lineární. *Lightpark* [online]. Praha: LIGHT PARK LTD, 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.lightpark.cz/osram-zariv-linear-lumilux-t8-l30w-840-g13/>
- [39] Úsporná žárovka E14/14W/230V 4200K. *Svět svítidel* [online]. Blansko: Donoci s. r. o., 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.svet-svitidel.cz/usporna-zarovka-e14-14w-230v-4200k/>
- [40] LED žárovka Classic A67 20W E27 teplá bílá. *Světžárovek.eu - LED žárovky, LED pásy, úsporné žárovky* [online]. Litoměřice: SVĚT ŽÁROVEK s. r. o., 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.svetzarovek.eu/p-144802/k-490/led-zarovka-classic-a67-20w-e27-tepla-bila/>
- [41] LED zářivka lineární T8, 18W, 2520lm, 4000K, 120cm, Alu+PC. *Světžárovek.eu - LED žárovky, LED pásy, úsporné žárovky* [online]. Litoměřice: SVĚT ŽÁROVEK s. r. o., 2019 [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.svetzarovek.eu/p-160617/k-627/led-zarivka-linearni-t8-18w-2520lm-4000k-120cm-alu-pc/>
- [42] *E.ON: Ceník Komplet elektřina II* [online]. České Budějovice: E.ON Energie a.s., 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/-a188849---pCsQ9Zvq/cenik-komplet-elektrina-ii-distribucni-uzemi-e-on-pdf>
- [43] ALOK, Dixit, Pathak GAURAV a K. SUDHAKAR. International Journal of Science, Environment and Technology: COMPARATIVE STUDY OF LIFE CYCLE COST OF MODERN LIGHT SOURCES USED IN DOMESTIC LIGHTING. Ajmer: Government Women Engineering College, 2015. ISSN 2278-3687.
- [44] ASHDOWN, Ian. Color Temperature and Outdoor Lighting: Examining the Limits of CCT. *Lightning Analysis: Illumination Engineering Software* [online]. 7. 6. 2015 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: <https://lightinganalysts.com/color-temperature-and-outdoor-lighting/>

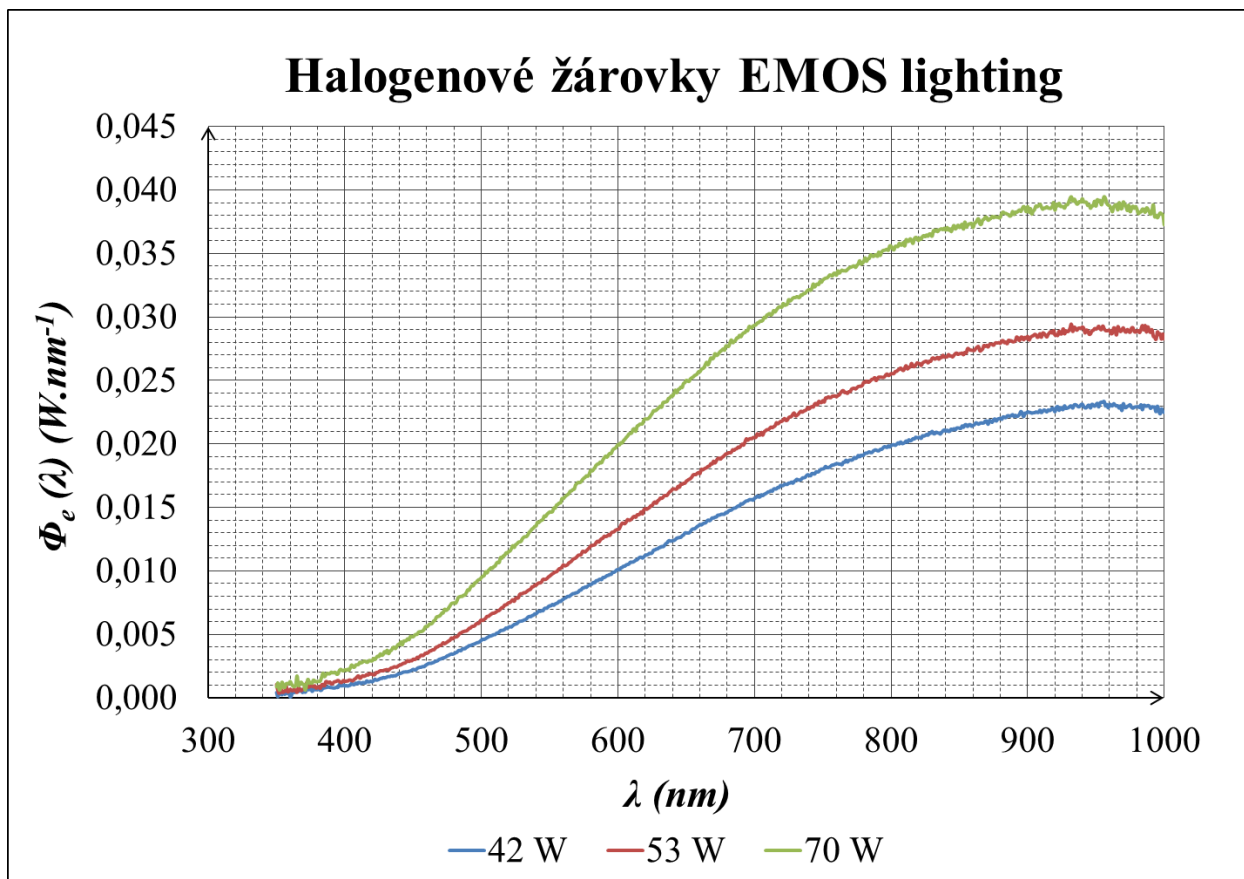
- [45] LED žárovka FLAIR 6 W, E27, A60. *HORNBACH – projektový hobbymarket* [online]. Praha: HORNBACH BAUMARKT CS spol. s r. o. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/shop/LED-zarovka-FLAIR-6W-E27-A60/5827434/artikl.html>
- [46] EMOS LED žárovka filament A60 8W E27 teplá bílá. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/emos-led-zarovka-filament-a60-a-8w-e27-tepla-bila-1525283240-p-53877.html>
- [47] EMOS LED žárovka filament A60 8W E27 studená bílá. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/emos-lighting-led-zarovka-filament-a60-a-8w-e27-studena-bila-1525733107-p-79915.html>
- [48] CENTURY LED filament hruška čirá 10W E27 2700K 1521lm. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/emos-lighting-led-zarovka-filament-a60-a-8w-e27-studena-bila-1525733107-p-79915.html>
- [49] CENTURY LED filament hruška čirá 10W E27 4000K 1521lm. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/century-led-filament-hruska-cira-10w-e27-4000k-1521lm-360d-67x111mm-ip20-cen-ing3102740-p-78480.html>
- [50] LED žárovka E27 Megaman A60 11 W teplá bílá 2800 K. *K & V ELEKTRO – E-shop s elektromateriálem* [online]. Praha: K & V ELEKTRO a.s. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.e1.cz/produkt/1286759-led-zarovka-e27-megaman-a60-11w-75w-tepla-bila-2800k-?t=popis>
- [51] LED žárovka E27 Megaman A60 11 W neutrální bílá 4000 K. *K & V ELEKTRO – E-shop s elektromateriálem* [online]. Praha: K & V ELEKTRO a.s. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.e1.cz/produkt/1299396-led-zarovka-e27-megaman-a60-11w-75w-neutralni-bila-4000k-?t=popis>
- [52] LED žárovka E27 Megaman A60 11 W studená bílá 6500 K. *K & V ELEKTRO – E-shop s elektromateriálem* [online]. Praha: K & V ELEKTRO a.s. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.e1.cz/produkt/1338737-led-zarovka-e27-megaman-a60-11w-75w-studena-bila-6500k-?t=popis>
- [53] Livarnolux LED žárovka 19 W. *Lidl-shop.cz* [online]. Praha: Lidl & Schwarz-Gruppe [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.lidl-shop.cz/LIVARNOLUX-LED-zarovka-17-19-W/p100271499>
- [54] Úsporná žárovka Osram DULUX TWIST 12 W E27 teplá bílá 2700 K. *K & V ELEKTRO – E-shop s elektromateriálem* [online]. Praha: K & V ELEKTRO a.s. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.e1.cz/produkt/1248277-usporna-zarovka-osram-dulux-twist-12w-e27-tepla-bila-2700k?t=popis>

- [55] Úsporná žárovka Osram DULUX TWIST 12W E14 studená bílá 6500 K. *K & V ELEKTRO – E-shop s elektromateriálem* [online]. Praha: K & V ELEKTRO a.s. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://www.e1.cz/produkt/1248239-usporna-zarovka-osram-dulux-twist-12w-e14-studena-bila-6500k?gclid=CjwKCAiA7t3yBRADEiwA4GFII2F9EVXWd2eWmLpwbdSd-z6cA-JBDAmokGpwqJ_fwsXpNxfcc_hQRoCDJwQAvD_BwE&t=popsis
- [56] Kompaktní zářivka OSRAM Dulux star stick 15W/827 E27. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/osram-duluxstar-stick-15w827-e27-p-14000.html>
- [57] Kompaktní zářivka OSRAM Dulux star stick 15W/865 E27. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/osram-duluxstar-stick-15w865-e27-p-13997.html>
- [58] Kompaktní zářivka OSRAM Dulux star mini twist 23W/827 E27. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/osram-duluxstar-mini-twist-23w827-e27-p-14058.html>
- [59] Kompaktní zářivka OSRAM Dulux pro mini twist 23W/840 E27. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/osram-dulux-pro-mini-twist-23w840-e27-p-14089.html>
- [60] Kompaktní zářivka OSRAM Dulux star mini twist 23W/865 E27. *Kupzarovsky.cz* [online]. Dolní Břežany: Kupžárovky s. r. o. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.kupzarovsky.cz/osram-duluxstar-mini-twist-23w865-e27-p-14062.html>
- [61] Vitae - 3 unikátní světla v jedné žárovce. *Design light* [online]. Praha: Hynek Medřický [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://www.design-light.cz/den-bulb.html#>
- [62] LED žárovka 10 W SMD2835 E27 806lm teplá, krokově stmívatelná. *SMDLEDžárovky.cz* [online]. Bohumín: LED21 s. r. o. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.smdledzarovsky.cz/led.zarovky/e27.velky.zavit/led.zarovka.10w.smd2835.e27.806lm.tepla.krokove.stmivatelna>
- [63] TRÅDFRI Sada dálkového ovládání, bílé spektrum, E27. *IKEA – nábytek a vybavení pro domácnosti a kanceláře* [online]. Delft, Nizozemsko: IKEA a. s. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.ikea.com/cz/cs/p/tradfri-sada-dalkoveho-ovladani-bile-spektrum-20406570/>
- [64] SLÁMA, Pavel. *Návrh měřicího pracoviště v Labview pro účely měření spektra a světelného toku* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jan Škoda.
- [65] DRÁPELA, Jiří, Petr BAXANT, Jan ŠLEZINGR a Tomáš PAVELKA. *Užití elektrické energie – Laboratorní cvičení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně

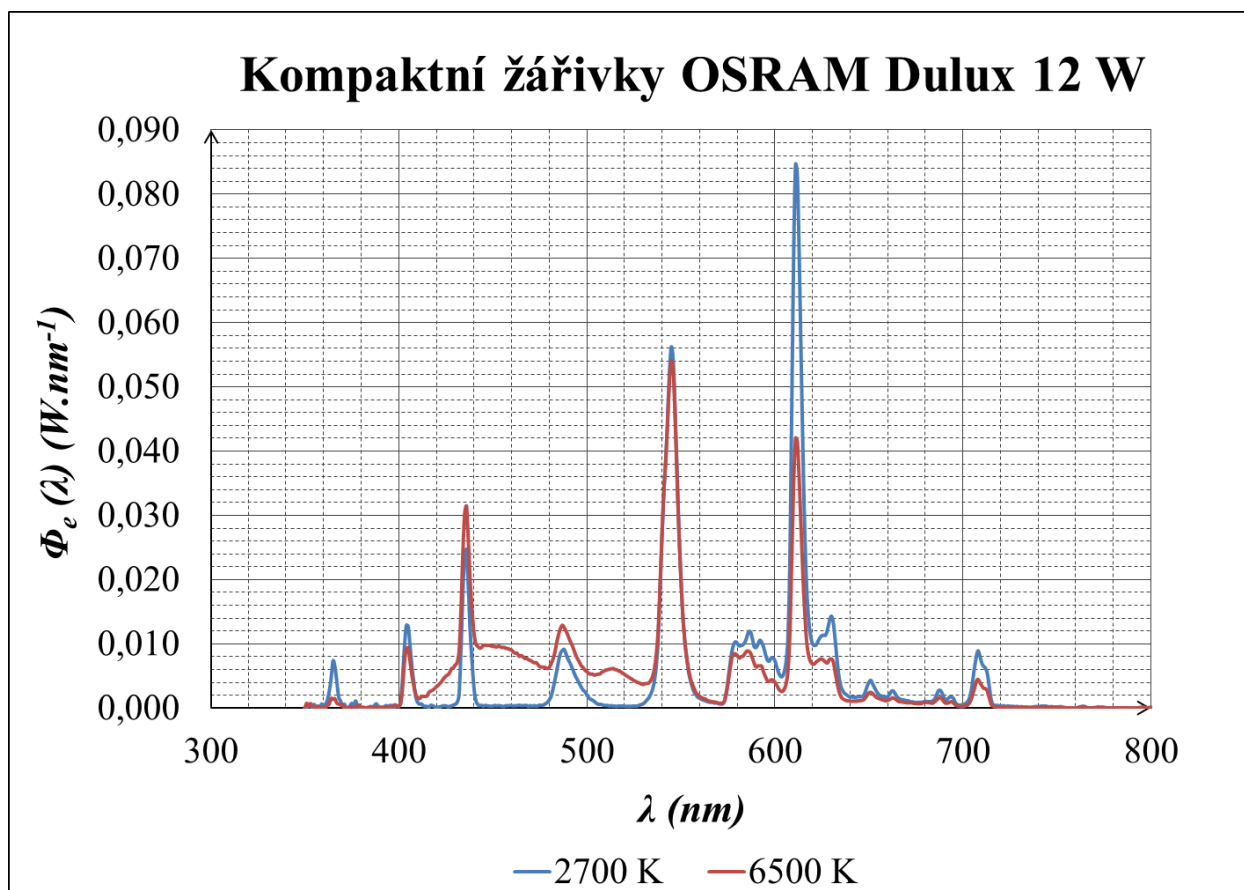
PŘÍLOHA A – SPEKTRÁLNÍ PRŮBĚHY ZMĚŘENÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ



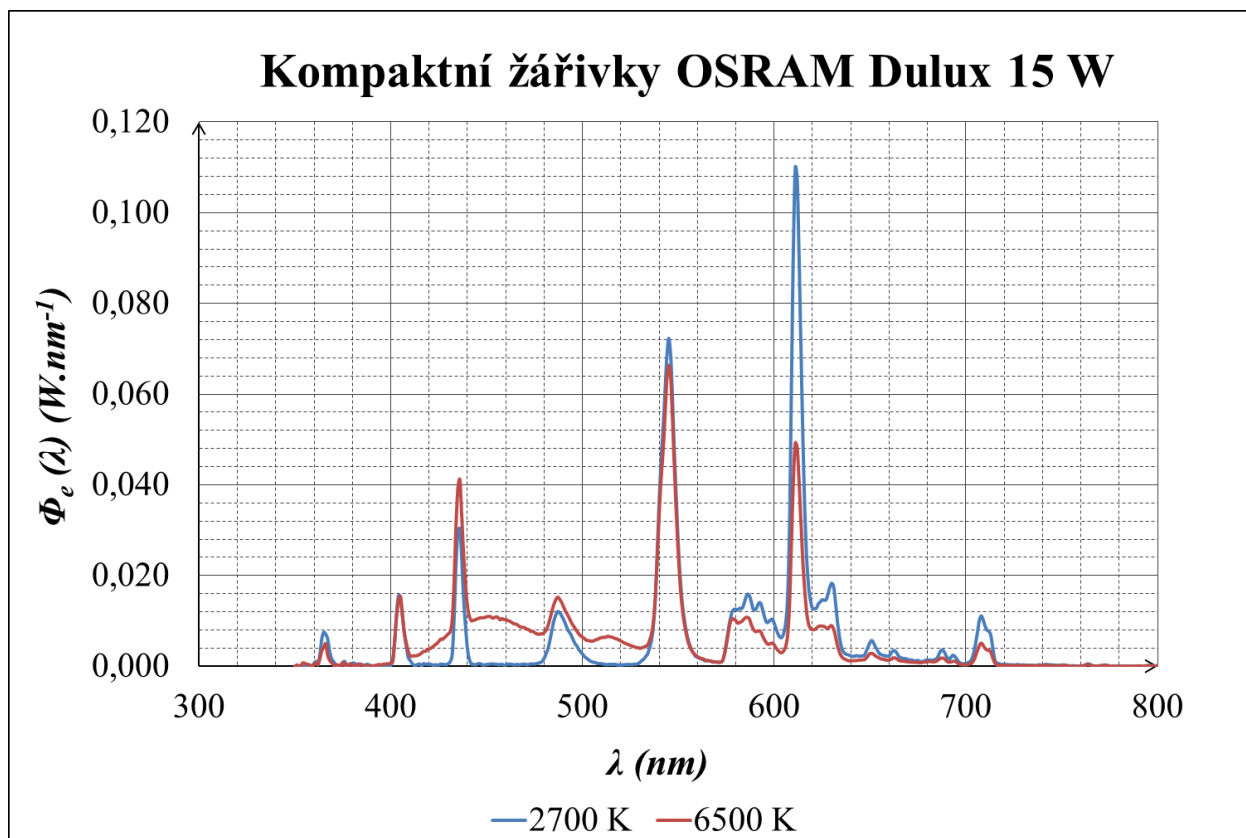
Graf 1 Spektrální průběhy klasických žárovek



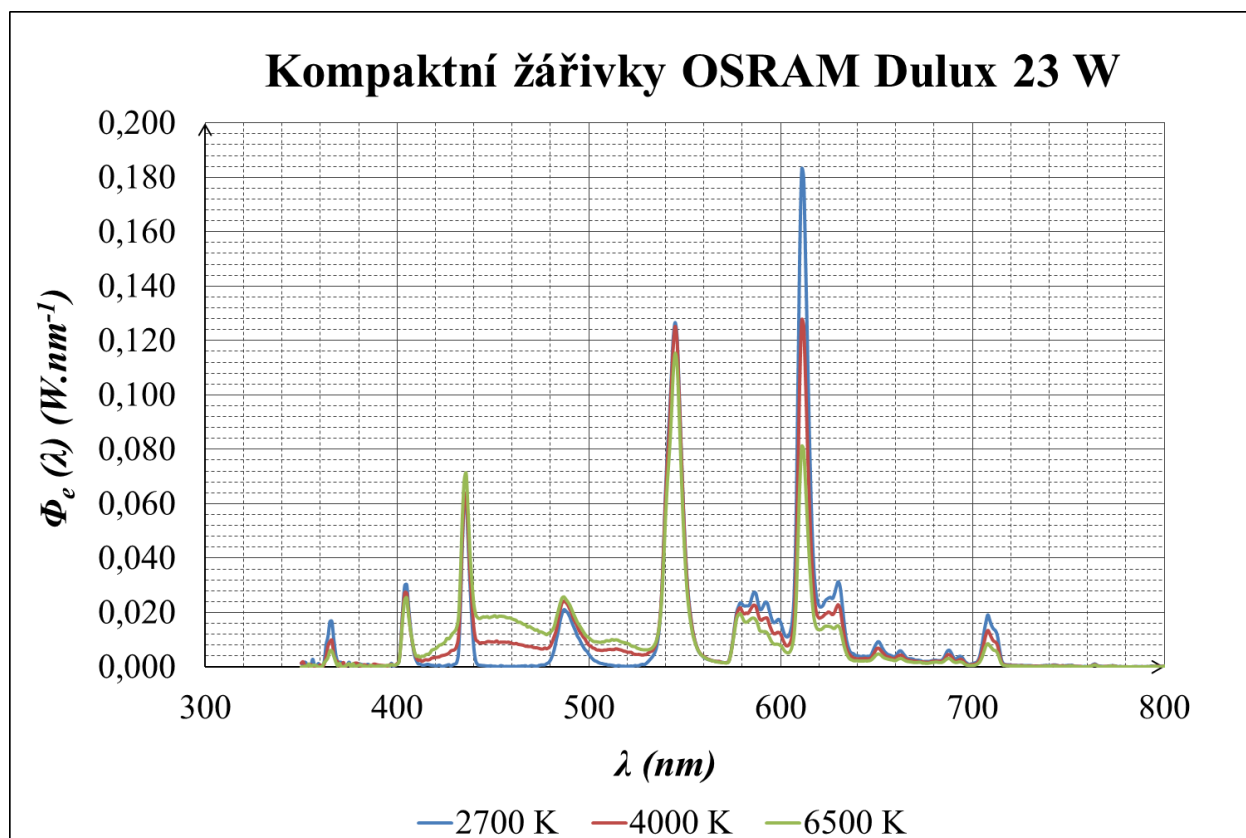
Graf 2 Spektrální průběhy halogenových žárovek



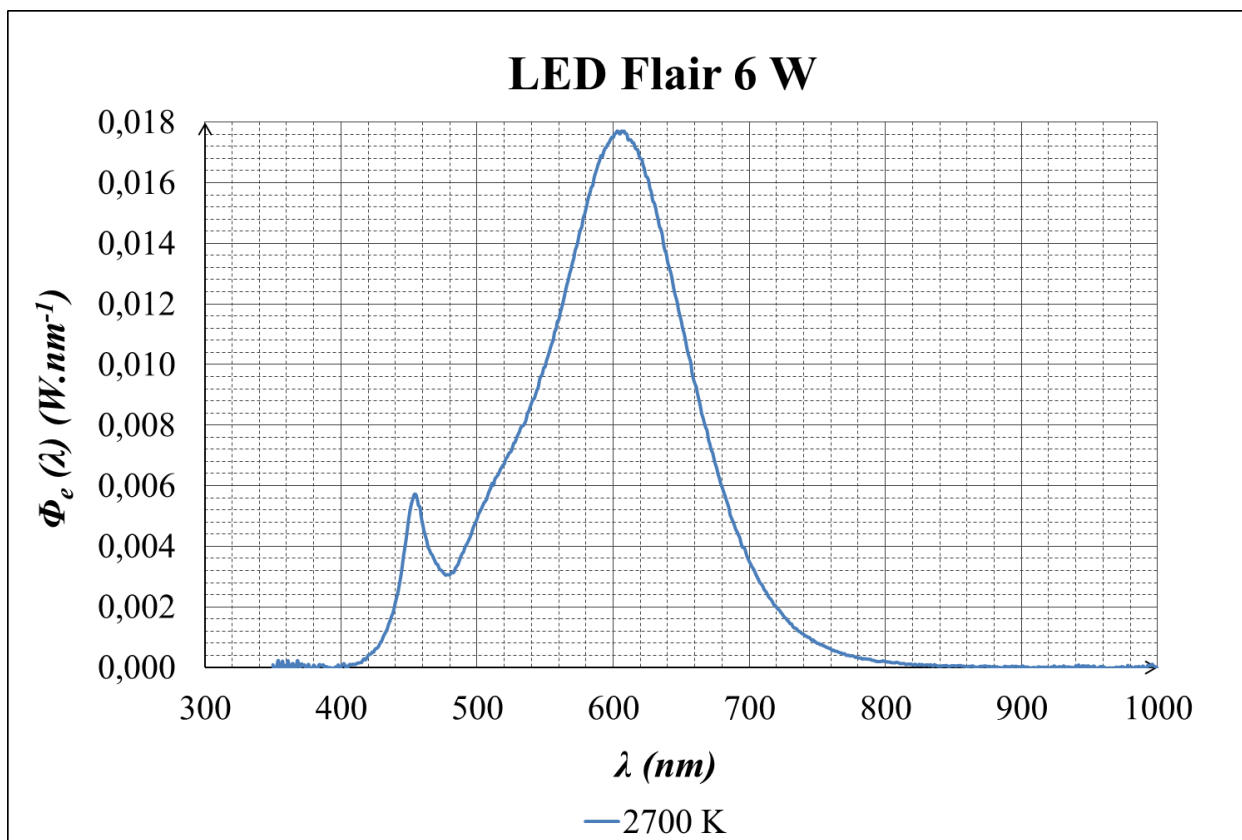
Graf 3 Spektrální průběhy kompaktních zářivek OSRAM Dulux 12 W



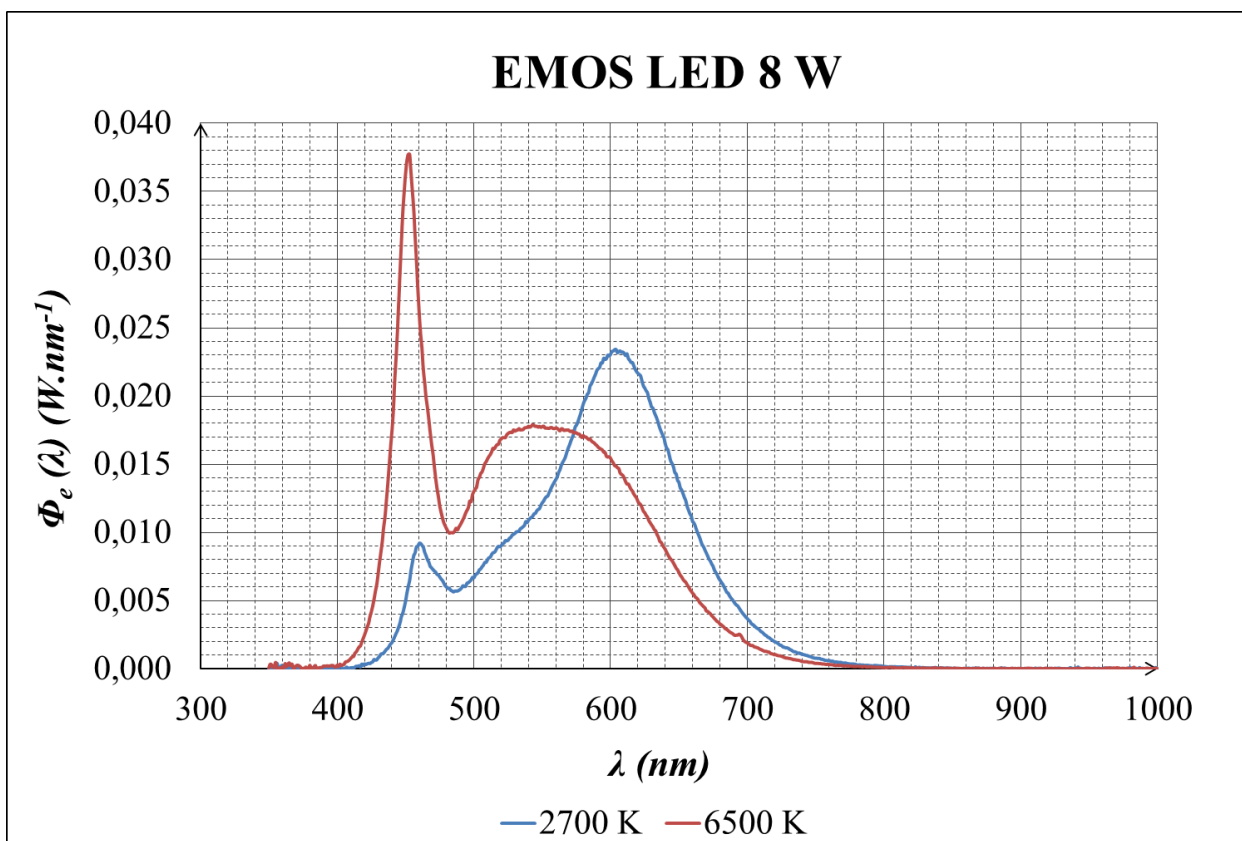
Graf 4 Spektrální průběhy kompaktních zářivek OSRAM Dulux 15 W



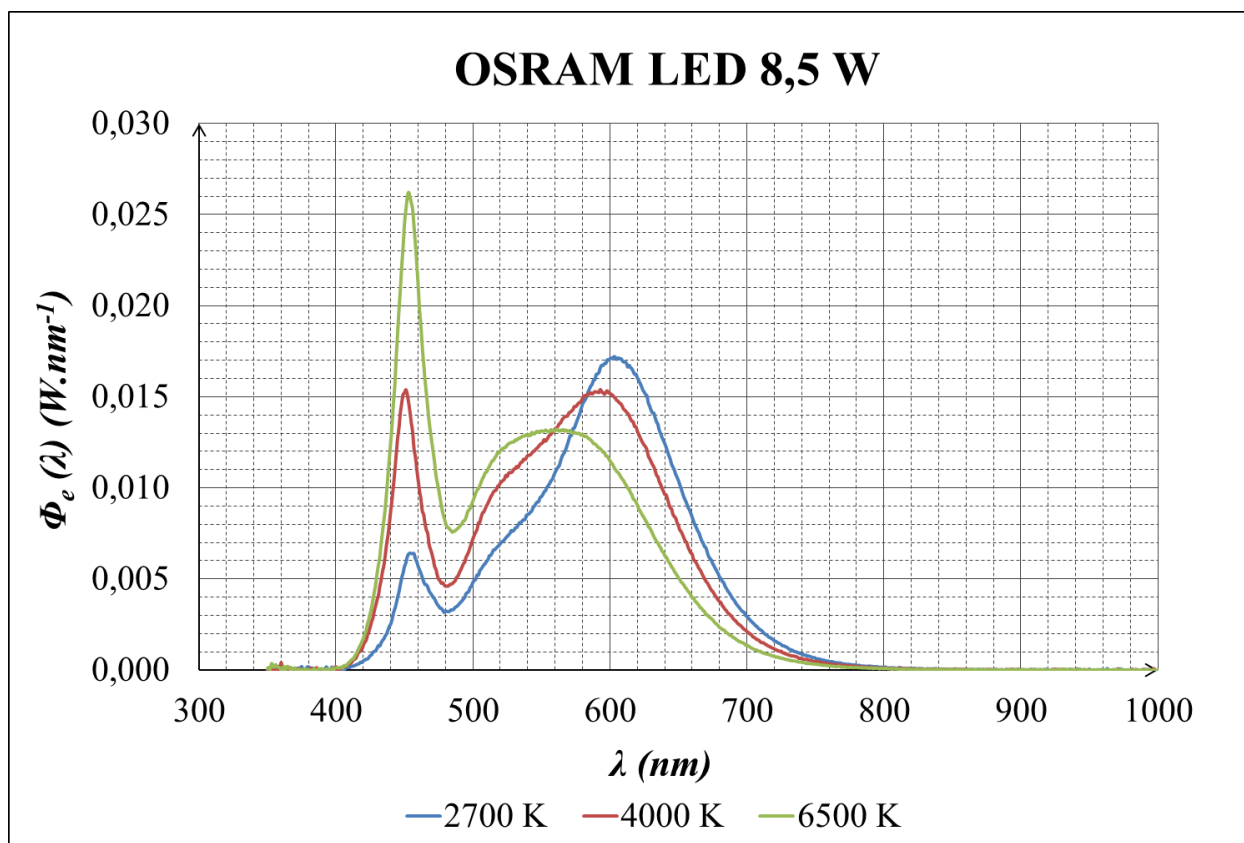
Graf 5 Spektrální průběhy kompaktních zářivek OSRAM Dulux 23 W



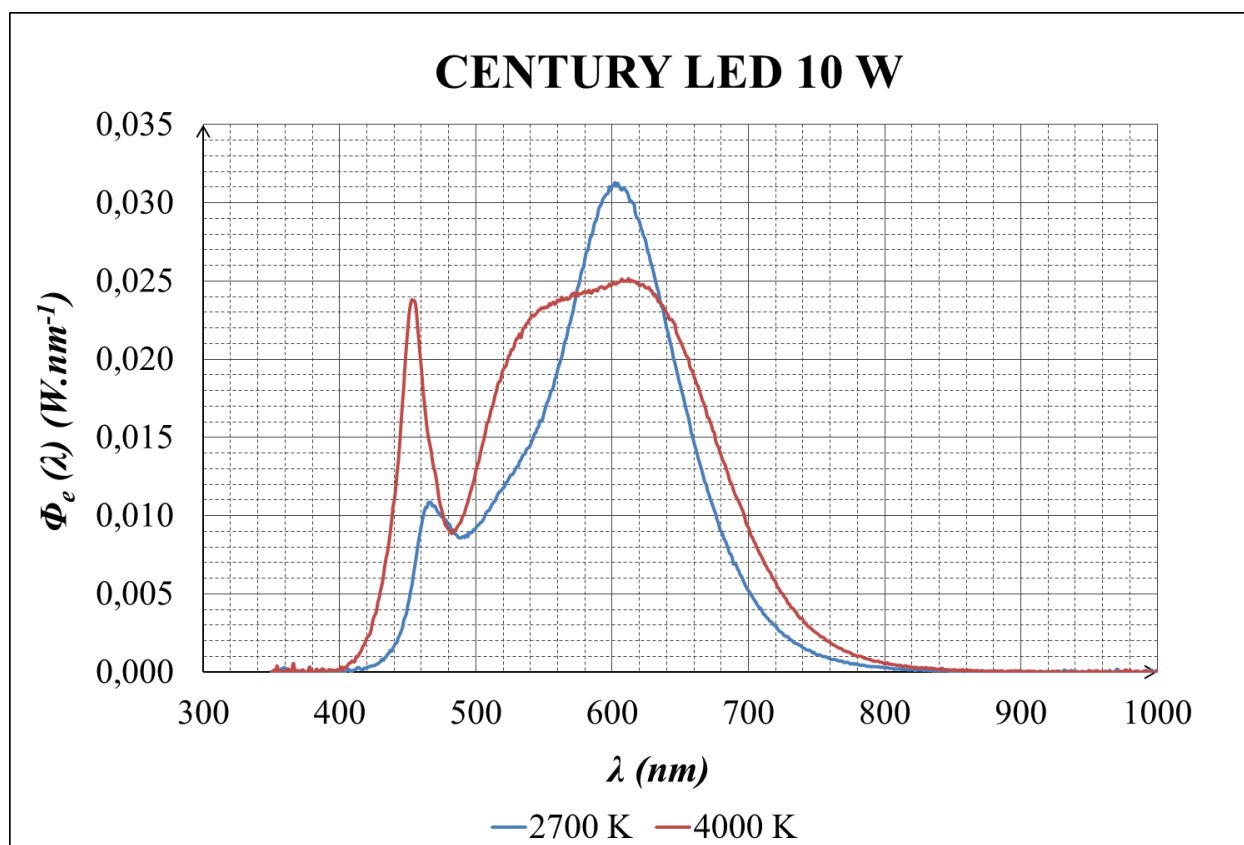
Graf 6 Spektrální průběh LED retrofitu Flair 6 W



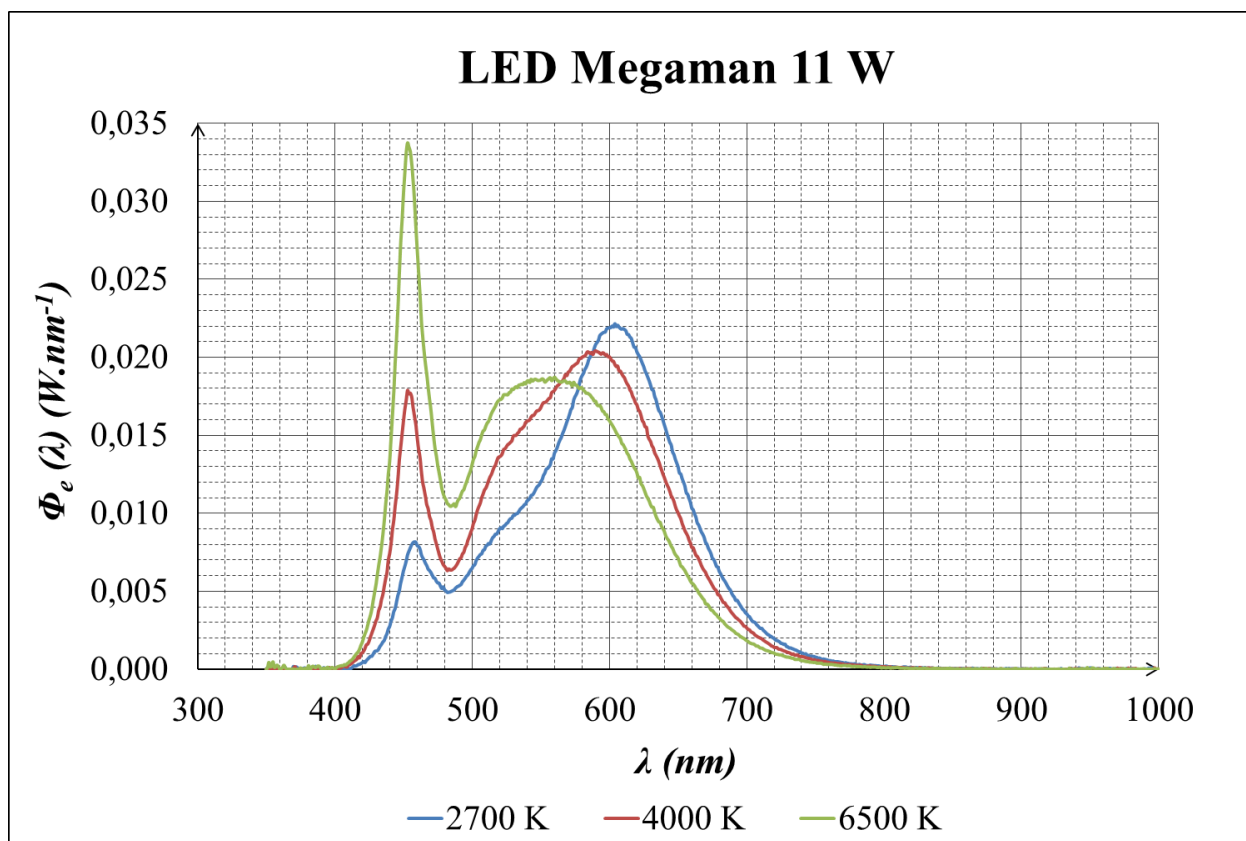
Graf 7 Spektrální průběhy LED retrofitů EMOS 8 W



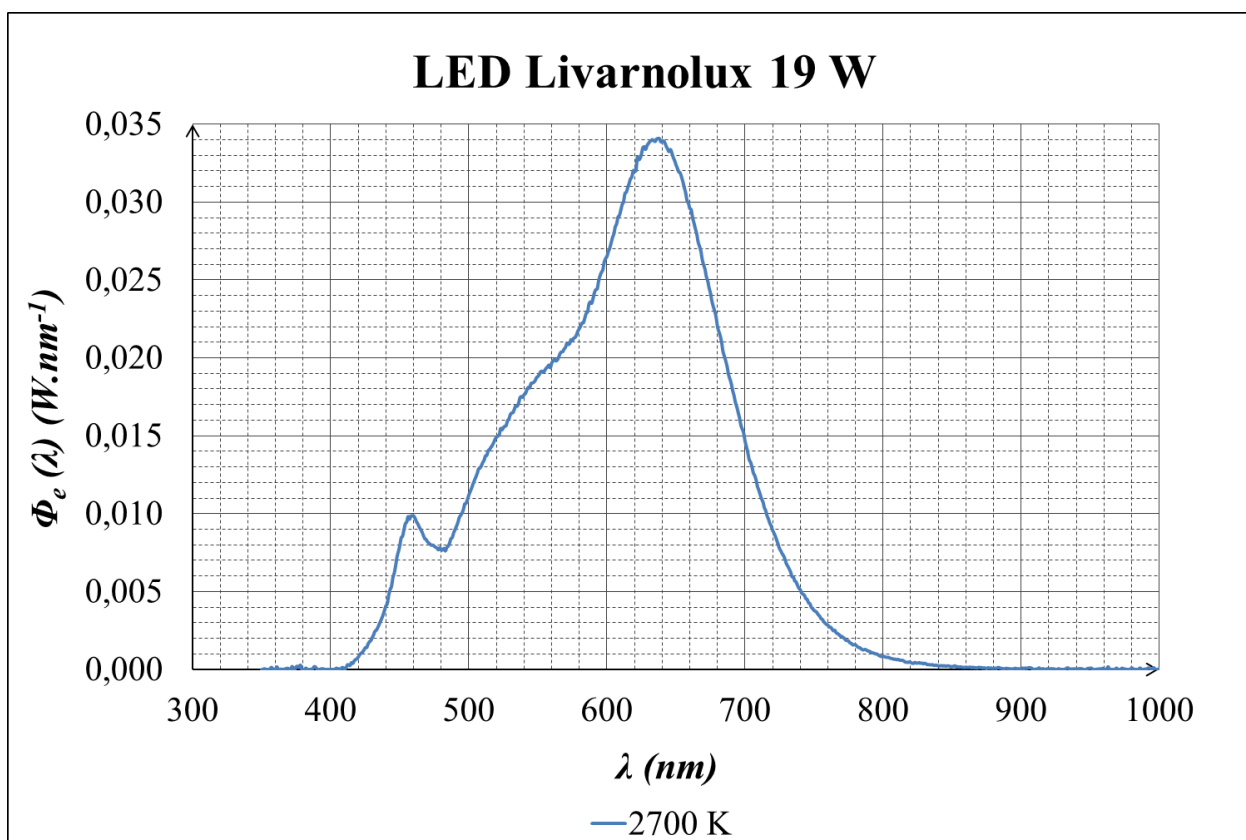
Graf 8 Spektrální průběhy LED retrofitů OSRAM 8,5 W



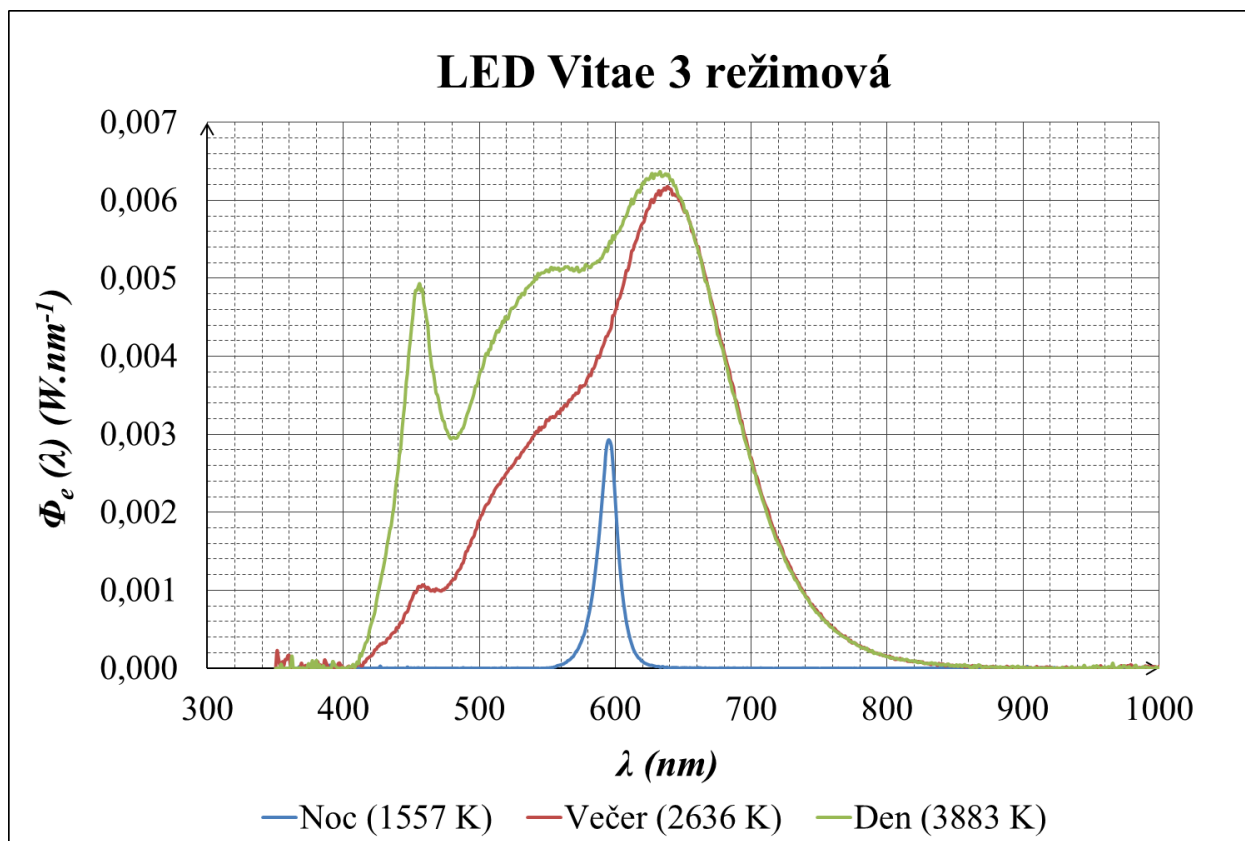
Graf 9 Spektrální průběhy LED retrofitů CENTURY 10 W



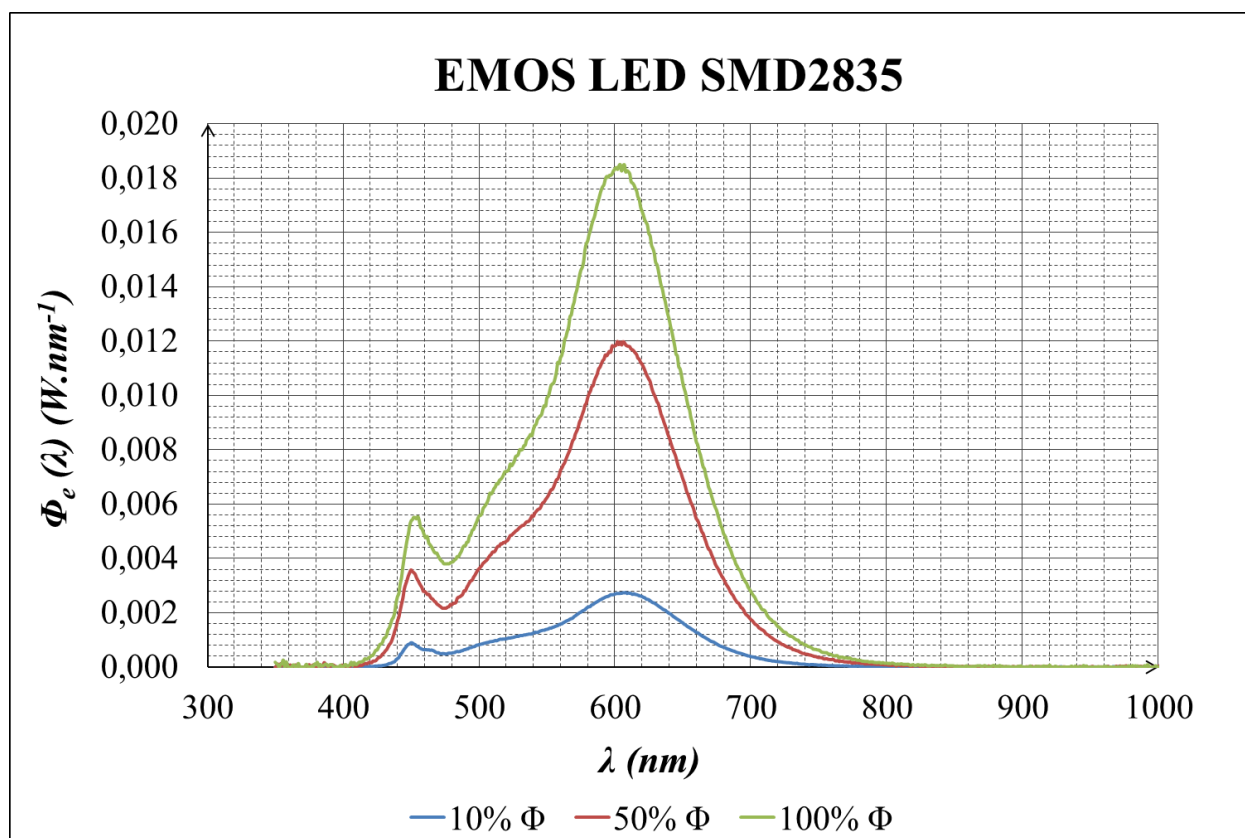
Graf 10 Spektrální průběhy LED retrofitů Megaman 11 W



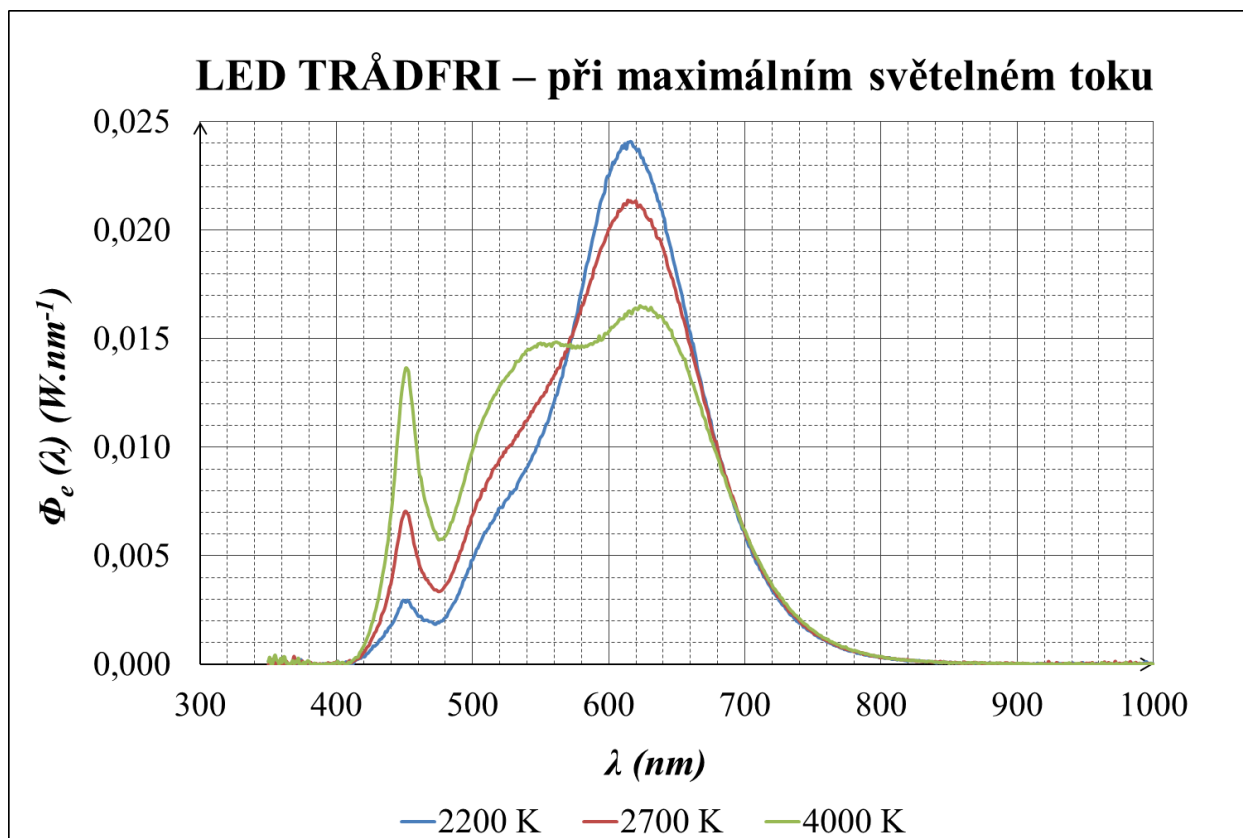
Graf 11 Spektrální průběh LED retrofitu Livarnolux 19 W



Graf 12 Spektrální průběhy 3 režimové LED Vitae



Graf 13 Spektrální průběhy LED retrofitu EMOS SMD2835



Graf 14 Spektrální průběhy LED retrofitu TRÁDFRI při maximálním světelném toku

PŘÍLOHA B – FOTOGRAFIE MĚŘENÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ



Foto 1 Měřené světelné zdroje